



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

DIRECCIÓN GENERAL DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN NUTRICIÓN VEGETAL

ALMACENAMIENTO DE CARBONO Y EVOLUCIÓN DE LA FERTILIDAD DE UN SUELO DESARROLLADO SOBRE GRANODIORITA, EN LA FASE INICIAL DE UNA PLANTACIÓN DE *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum* CON ENMIENDAS DE CARBÓN VEGETAL, EN LA ZONA SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el grado de Magister en Nutrición Vegetal

AUTOR:

Miguel Ángel Villamagua.

DIRECTOR:

Ing. M.Sc. Carlos Valarezo Manosalvas

Santo Domingo – Ecuador

Marzo–2014

TEMA DE TESIS:

ALMACENAMIENTO DE CARBONO Y EVOLUCIÓN DE LA FERTILIDAD DE UN SUELO DESARROLLADO SOBRE GRANODIORITA, EN LA FASE INICIAL DE UNA PLANTACIÓN DE *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum* CON ENMIENDAS DE CARBÓN VEGETAL, EN LA ZONA SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA

Ing. M.Sc. Carlos Valarezo Manosalvas. _____

DIRECTOR DE TESIS**APROBADO**

Dra. M.Sc. Luz María Martínez Buñay
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL _____

Ing.M.Sc. Mario José Añazco Romero
MIEMBRO DEL TRIBUNAL _____

Ing.Ph.D. Edisón Gastón Silva Cifuentes
MIEMBRO DEL TRIBUNAL _____

Santo Domingo.....de.....2014.

CERTIFICACIÓN DEL ESTUDIANTE DE AUTORÍA DEL TRABAJO

Yo, Miguel Ángel Villamagua, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido presentado para ningún grado o calificación profesional.

Además; y, que de acuerdo a la Ley de propiedad intelectual, el presente trabajo de investigación pertenecen todos los derechos a la Universidad Tecnológica Equinoccial, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Ing. Miguel Ángel Villamagua
C.I.1102049978

INFORME DE APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

APROBACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de Director del Trabajo de Grado titulado “ALMACENAMIENTO DE CARBONO Y EVOLUCIÓN DE LA FERTILIDAD DE UN SUELO DESARROLLADO SOBRE GRANODIORITA, EN LA FASE INICIAL DE UNA PLANTACIÓN DE *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum* CON ENMIENDAS DE CARBÓN VEGETAL, EN LA ZONA SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA”, presentado por el Señor Ingeniero Miguel Ángel Villamagua, previo a la obtención del Grado de **Magister en Nutrición Vegetal**, considero que dicho Trabajo reúne los requisitos y disposiciones emitidas por la Universidad Tecnológica Equinoccial por medio de la Dirección General de Posgrado para ser sometido a la evaluación por parte del Tribunal examinador que se designe.

Dado en la ciudad de Loja, a los 10 días del mes de julio de 2013.

Ing. M.Sc. Carlos Antonio Valarezo Manosalvas
CI. 1100438553

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Loja por darme la oportunidad de cursar la maestría y por cubrir los gastos de la misma; al Ing. M.Sc. Carlos Valarezo M. autor del proyecto “Gestión de la fertilidad de los suelos con enmiendas de carbón vegetal en plantaciones de árboles maderables en el sur de la amazonia ecuatoriana” financiado por el SENESCYT y Director de la presente de tesis, por su asesoramiento oportuno, con una elevada base científico-técnico; al Batallón de Selva BS 62 de la provincia de Zamora Chinchipe, por haber concedido los terrenos para la instalación de los experimentos; al laboratorio de suelos del departamento de Geografía de la Universidad de Berna – Suiza, en la persona del Prof. Wolfgang Wilcke; a la Ing. Esthela González por los análisis de laboratorio; y al Ing. Ph.D Edison Silva e Ing. M.Sc Mario Añasco por su contribución en la revisión del documento.

DEDICATORIA

Con acendrada admiración y justo amor a la memoria de mi madre Sara Luzmila, quien me brindó todo su amor, por ser ella quien orientó mi crecimiento espiritual y mi superación profesional, a mi compañera Carmen Jenny, por ser la inspiración de mi vida y por su apoyo incondicional al cumplimiento de esta meta, a mis hijos Miguel Ángel y Andrés Felipe Manuel Antonio, por ser la razón de vivir.

Miguel Angel

TABLA DE CONTENIDOS

N°	Pág.
ÍNDICE DE CUADROS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1. EL PROBLEMA.....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Formulación del Problema.	3
1.3. Sistematización del Problema o Interrogantes.	3
1.4. Objetivos de la Investigación.	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. Justificación de la investigación.	4
1.6. Alcance de la investigación.....	5
CAPÍTULO.....	II
.....	7
MARCO DE REFERENCIA.....	7
2.1 Investigaciones relacionadas con el tema.....	7
2.2 Marco Teórico.	8
2.2.1 Funciones protectoras y ambientales del bosque.....	8
2.2.2 Suelos del trópico húmedo y de la zona sur de la amazonia ecuatoriana.	9
2.2.3 El carbón vegetal en el mejoramiento de los suelos del trópico húmedo.....	10
2.2.4 La acidez y su control en los suelos del trópico húmedo.....	11

2.2.5	El cambio climático global y su mitigación.	12
2.2.6	Especies maderables en el sur de la amazonia ecuatoriana.	17
2.3	Marco conceptual ó (definición de términos básicos).....	18
2.4	Sistema de Hipótesis.	21
2.4.1	Hipótesis Específicas.....	21
2.5	Sistema de variables.....	21
CAPÍTULO III.....		23
MARCO METODOLÓGICO.....		23
3.1.	La zona de estudio y el sitio experimental.....	23
3.2.	Materiales y Equipos.....	24
3.3.	Diseño de la Investigación.	24
3.3.1.	Diseño experimental, factores en estudio, niveles y tratamientos.....	25
3.3.2.	Especificaciones del experimento.....	26
3.4.	Métodos de investigación.....	26
3.4.1.	Evaluación de las condiciones físicas, químicas y la fertilidad actual y potencial del suelo.	27
3.4.2.	Plantación de las especies maderables y aplicación de enmiendas.....	28
3.4.3.	Evaluación del carbono en el suelo y la biomasa.	30
3.5.	Métodos de investigación.....	32
3.6.	Población y Muestra.....	32
3.6.1.	Población.	32
3.6.2.	Muestra.	32
3.7.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	33
3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de los datos.....	33
3.9.	Confiablez de validez de instrumentos.	33
CAPÍTULO IV.....		35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		35

4.1.	Crecimiento de las especies arbóreas.....	35
4.1.1.	Altura de planta.....	35
4.1.2.	Diámetro basal.....	37
4.1.3.	Diámetro a la altura del pecho (DAP).....	38
4.1.4.	Volumen (m ³ ha ⁻¹).....	38
4.2.	Características físico-químicas del suelo y evolución de las condiciones químicas y de fertilidad.....	39
4.2.1.	Características físicas del suelo.....	39
4.2.2.	Contenidos totales de los elementos.....	42
4.2.3.	Evolución de las condiciones químicas del suelo hasta 50 cm de profundidad.....	54
4.2.4.	Disponibilidad de nutrientes.....	60
4.3.	Captura de carbono por las especies arbóreas maderables y aporte al suelo.....	66
4.3.1.	Biomasa y contenido de carbono en las especies arbóreas.....	66
4.3.2.	Carbono en el suelo.....	67
4.3.3.	Almacenamiento de C en la biomasa y en el suelo.....	67
CAPÍTULO V		71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		71
5.1	Conclusiones.....	71
5.2	Recomendaciones.....	72
CAPÍTULO VI		74
BIBLIOGRAFÍA.....		74
7	ANEXOS.....	82

ÍNDICE DE CUADROS

N°	Pág.
3.1. Factores y niveles del experimento.....	25
3.2. Tratamiento del experimento.....	25
3.3. Dosis de elementos aplicados por planta y fuentes utilizadas.	29
3.4. Análisis de varianza para el diseño de parcelas subdivididas.	33
4.1. Análisis de regresión lineal simple para altura de planta (m) a través del tiempo para pachaco y melina con y sin fertilización.	36
4.2. Infiltración básica en los bloques del sitio experimental.	41
4.3. Contenidos totales de Ca, Mg, K, Mn, Al, Fe, Zn Cu, Si en el Perfil del experimento.	42
4.4. Contenidos totales de Ca, Mg, K, Mn, Al, Fe, Zn Cu y Si en la capa 00 - 25 cm antes de la fertilización (marzo 2009) y sitios referenciales.	44
4.5. Promedios y prueba de Tukey al 5% para pH _{H2O} en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.	55
4.6. Promedios y prueba de Tukey al 5% para acidez intercambiable (Al ³⁺⁺ H ⁺) cmol (+) kg ⁻¹ , en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.	56
4.7. Promedios y prueba de Tukey al 5% para CICE cmol (+) kg ⁻¹ , en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.....	56
4.8. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Ca cmol (+) kg ⁻¹ , en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.....	57
4.9. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Mg ⁺⁺ (cmol (+) kg ⁻¹), en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.....	58
4.10. Promedios y prueba de Tukey al 5% para K cmol (+) kg ⁻¹ , en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.....	59
4.11. Promedios y prueba de Tukey al 5% para % SB, en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.	60
4.12. Promedios y prueba de Tukey al 5% para P mg kg ⁻¹ en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.	61

- 4.13. Promedios y prueba de Tukey al 5% para K mg kg⁻¹ en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.62
- 4.14. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Ca disponible (mg kg⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.....62
- 4.15. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Mg disponible (mg kg⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.....63
- 4.16. Promedios y prueba de Tukey al 5% para Zn disponible (mg kg⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.....64
- 4.17. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para Fe disponible (mg kg⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.....65
- 4.18. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para Mn disponible (mg kg⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.....66

ÍNDICE DE FIGURAS

N°	Pág.
3.1.	Ubicación del experimento en el sitio La Victoria del cantón Zamora de la provincia de Zamora Chinchipe en el sur de la Amazonía Ecuatoriana.23
4.1.	Evolución de la altura del pachaco sin y con fertilización (aplicación de N, P, K, Mg, S, Zn + cal) hasta los 720 días después de la plantación.35
4.2.	Evolución de la altura de la melina sin y con fertilización (aplicación de N, P, K, Mg, S, Zn + cal) hasta los 720 días después de la plantación.36
4.3.	Evolución del DB del pachaco sin y con fertilización hasta los 720 días después de la plantación.37
4.4.	Evolución del DB de la melina sin y con fertilización hasta los 720 días después de la plantación.38
4.5.	Perfil 1 del área experimental.....40
4.6.	Evolución del contenido total de Ca, en las capas 00 – 25 cm y 25 - 50 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación, bloque I del experimento46
4.7.	Evolución del contenido total de Mg, en las capas 00 - 25 y 25 - 50 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación, bloque I del experimento.47
4.8.	Evolución del contenido total de K, en las capas 00 – 25 cm y 25 - 50 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación, bloque I del experimento48
4.9.	Evolución del contenido total de Na, en las capas de 00 - 25 y 25 - 50 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación, bloque I del experimento49
4.10.	Evolución del contenido total de Fe, en las capas 00 - 25 cm y 25 - 50 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación, bloque I del experimento50
4.11.	Evolución del contenido total de Zn, en las capas 00 - 25 y 25 - 50 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación, bloque I del experimento51
4.12.	Evolución del contenido total de Mn, en las capas 00 - 25 cm y 25 - 50 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación, bloque I del experimento52
4.13.	Evolución del contenido total de Al, en las capas 00 – 25 cm y 25 - 50 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación, bloque I del experimento53

ÍNDICE DE ANEXOS

7.1. Esquema de distribución de los tratamientos y una subparcela	82
7.2. Descripción del perfil de suelo.	83
7.3. Ecuación alométrica del pachaco.....	86
7.4. Ecuación alométrica de la melina.....	86
7.5. Análisis de varianza para la variable Altura de planta, en seis fechas de muestreo, en días después de la plantación.....	87
7.6. Análisis de varianza para la variable diámetro basal, en seis fechas de muestreo, en días después de la plantación.....	87
7.7. Diámetro de altura al pecho (DAP), Volumen de las especies arbóreas a los dos años después de la plantación en el experimento	88
7.8. Contenidos Totales de Ca, Mg, K, Na, Mn, Al, Fe, Zn, Si y Mo (mg kg ⁻¹), en las capas, de las parcelas del bloque I, a los 6 y 18 meses después de la fertilización.	88
7.9. Balance del contenido total de Ca (g kg ⁻¹) en las capas de las parcelas del bloque 1, a los 6 y 18 meses después de la fertilización	89
7.10. Balance y medias de contenidos totales de Ca, Mg, K (g kg ⁻¹), Na, Mn, Zn (mg kg ⁻¹), Al, Fe y Si (g kg ⁻¹), en las capas, de las parcelas del bloque I, a los 6 y 18 meses después de la fertilización	89
7.11. Adeva para el pH _{H2O} en tres épocas de muestreo (meses después de la plantación), en las capas	89
7.12. Adeva para la acidez intercambiable (Al ³⁺ + H ⁺) cmol (+) kg ⁻¹ en tres fechas de muestreo, en las capas.....	90
7.13. Adeva para la CICe en tres épocas de muestreo, en las capas	90
7.14. Adeva para el Ca ⁺⁺ en tres épocas de muestreo, en las capas.....	90
7.15. Adeva para el Mg ⁺⁺ en tres épocas de muestreo, en las capas	91
7.16. Adeva para el K ⁺ en tres épocas de muestreo, en las capas de suelo.....	91
7.17. Adeva para el Na ⁺ en tres fechas de muestreo, en las capas de suelo	91
7.18. Adeva para la SB % en tres fechas de muestreo, en las capas de suelo	92
7.19. Adeva para N disponible, 24 meses después de la plantación, en las capas.	92

7.20. Adeva para el P disponible en tres fechas de muestreo, en las capas	93
7.21. Adeva para el K disponible en tres épocas de muestreo, en las capas	93
7.22. Adeva para el Ca disponible en tres épocas de muestreo, en las capas	94
7.23. Adeva para el Mg disponible en tres épocas de muestreo, en las capas.....	94
7.24. Adeva para el Zn disponible en tres épocas de muestreo, en las capas	95
7.25. Adeva para el Cu disponible en tres épocas de muestreo, en las capas	95
7.26. Adeva para el Fe disponible en tres fechas de muestreo, en las capas	95
7.27. Adeva para el Mn disponible en tres fechas de muestreo, en las capas.....	96
7.28. Análisis de varianza de biomasa aérea, C en la biomasa, C en el suelo (t/ha) en las capas; y C total (biomasa + C 00-50 cm suelo), a los dos años después de la plantación.	96



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

“Almacenamiento de carbono y evolución de la fertilidad de un suelo desarrollado sobre granodiorita, en la fase inicial de una plantación de *Gmelina arborea* Roxb. y *Schizolobium parahybum* Vell. Conc con enmiendas de carbón vegetal, en la zona sur de la amazonia ecuatoriana”

Autor: Miguel A Villamagua
Director: Ing. M.Sc. Carlos Valarezo M.

RESUMEN

En un suelo ácido (granodiorita) del ambiente de ladera del sur de la amazonia ecuatoriana se instaló un experimento en parcelas subdivididas (2x2x3) para determinar el efecto del carbón vegetal (0, 3, y 6 t ha⁻¹), cal (5 t ha⁻¹) y nutrientes (N; P, K; Mg y Zn), sobre el crecimiento inicial de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) y pachaco (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc), y la evolución de las condiciones físico-químicas del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el almacenamiento de C. A los dos años se encontró diferencias estadísticas altamente significativas por la fertilización en: altura de planta, diámetro basal y diámetro de altura al pecho. En la capa 00 – 25 cm de los tratamientos con fertilización, se incrementaron los contenidos totales Ca, Mg, K y Zn. En la capa 25 – 50 cm de los tratamientos fertilizados se incrementaron las concentraciones de Mg y K. El pH_{H₂O} en las dos capas de los tratamientos fertilizados evolucionó de 4,8 a 5,2 y de 4,7 a 4,8, respectivamente y la acidez intercambiable disminuyó; además, se incrementaron las concentraciones de Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺; el K⁺ permaneció bajo. En la capa 00 – 25 cm de los tratamientos fertilizados se incrementó la disponibilidad de P, Ca, Mg y Zn; el N, K y Cu permanecieron en el rango bajo. En los tratamientos fertilizados se incrementó el C almacenado en la biomasa aérea y biomasa + capa 00- 50 cm en 17,4 y 25 t ha⁻¹, respectivamente.

Palabras claves: Palabras claves: carbón vegetal, *Schizolobium parahybum*, *Gmelina arborea*, suelos degradados del trópico húmedo, amazonia ecuatoriana.

ABSTRACT

Carbon storage and fertility evolution on a soil developed on granodiorite treated with biochar in the initial phase of a *Gmelina arborea* Roxb. and *Schizolobium parahybum* Vell. Conc plantation in the South Ecuadorean Amazonia.

In an acid steep slope soil (granodiorite) of the Sothern Ecuador Amazonia, a double split plot experiment was installed aiming to determine the effect of biochar (0, 3, y 6 t ha⁻¹), lime (5 t ha⁻¹) and nutrients (N; P, K; Mg y Zn) on the initial growth of melina (*Gmelina arborea* Roxb.) and pachaco (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc), the evolution of the soil physico-chemical conditions and the storage of C. After two years high statistical differences were found for plant height, basal diameter and BHD. In the fertilized ones the total concentration of Ca, Mg, K and Zn increased in the 00 – 25 cm layer and Mg and K in the 25 – 50 cm layer; pH_{H2O} changed from 4,8 to 5,2 and 4,7 to 4,8, respectively, and the exchangeable acidity decreased. Ca⁺⁺ and Mg⁺⁺ increased while K⁺ remained low. The availability of P, Ca, Mg and Zn increased; N, K and Cu remained low. C storage increased in the aerial biomass and in aerial biomass + 00 – 50 layer, 17, 4 and 25 t ha⁻¹, respectively.

Key words: Charcoal, *Schizolobium parahybum*, *Gmelina arborea*, degraded soils in the humid tropics, ecuadorian amazonia.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Ante la necesidad de recuperar productivamente los suelos de ladera del territorio del corredor de la red fluvial Zamora – Nangaritza, degradados por efecto de la conversión del bosque natural a pastizales para la ganadería bovina, la Universidad Nacional de Loja (UNL) viene desarrollando el proyecto de investigación *“Gestión de la fertilidad del suelo con enmiendas de carbón vegetal en plantaciones de árboles maderables en el Sur de la Amazonia Ecuatoriana”*, cuyo objetivo general se orienta a generar alternativas para la repoblación forestal productiva de las áreas degradadas, en el marco de una gestión sostenida de la fertilidad de los suelos. Para ello, se ha propuesto probar una combinación de enmiendas de carbón vegetal, cal, y nutrientes, en tres suelos representativos de la zona, desarrollados sobre granodiorita, andesita y arenisca cuarzosa. Dentro de este proyecto se desarrolló la presente investigación.

1. EL PROBLEMA.

1.1. Planteamiento del Problema.

El corredor de la red fluvial Zamora-Nangaritza, en la zona sur de la Región Amazónica Ecuatoriana (RAE), que se extiende entre las ciudades de Zamora en el sur y Gualaquiza en el norte, lo comparten los cantones Zamora, Yantzatza, Centinela del Cóndor, Nangaritza y El Panguí de la provincia de Zamora Chinchipe; y, Gualaquiza de la provincia de Morona Santiago.

En el ambiente de ladera de este territorio se han desarrollado principalmente sobre el gran batolito de Zamora, los suelos de las ondulaciones, el pie de monte, las colinas y montañas bajas, en el rango de 800 a 1100 msnm. Son suelos muy profundos, arcillosos, fuertemente ácidos y han evolucionado a los estados intermedio y avanzado de la meteorización ferralítica (acumulación residual de Fe y Al), por lo que pertenecen al orden de los Ultisoles (Kandiudults, Kanhapludults) (Valarezo, 2004a).

En condiciones naturales (sin intervención humana), estos suelos soportan un frondoso bosque tropical biodiverso y multi-estrato, constituido por un conjunto de especies en perfecto equilibrio y armonía, cuya reserva de nutrientes se concentra en la biomasa y en la capa orgánica superior. Entre la vegetación y el horizonte superficial se produce el continuo y permanente reciclaje de los nutrientes, bajo el denominado “ciclo orgánico”, constituyéndose en un ecosistema cerrado, en el cual el bosque se alimenta de sí mismo (Valarezo, 2004a).

La intervención de los colonos sobre este bosque natural, ha consistido en la extracción de las especies arbóreas de valor comercial, luego la tumba, roza y quema del bosque remanente, seguida del cultivo de naranjilla, para finalmente establecer pastizales. Así, la conversión del bosque natural a pastizal, interrumpe abruptamente el reciclaje natural de los elementos nutritivos, los cuales se lixivian por efecto de la abundante lluvia, se acelera la mineralización de la reserva de materia orgánica, y se instala un proceso de erosión laminar hídrica, por lo que en un tiempo relativamente corto se degrada la fertilidad del suelo y las tierras se convierten en marginales, constituyéndose en “desiertos de fertilidad”, que se caracterizan por una fuerte acidez, presencia de aluminio tóxico, y la baja disponibilidad de macro y micronutrientes, principalmente nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, zinc, boro, entre otros. Se estima que actualmente la afectación alcanza alrededor del 50 % de las áreas del pie de monte y las colinas y montañas bajas (alrededor de 50 000 ha), la misma que sigue creciendo a expensas de la destrucción del bosque primario (Valarezo *et al.*, 1998).

Si bien, desde la perspectiva de la utilización productiva y la recuperación de las áreas degradadas, estas tierras de ladera (pendiente de 12 % a 60 %) tendrían vocación para la repoblación forestal con especies de valor comercial, aprovechando las condiciones de elevada temperatura y humedad de la zona, que la convierten en un invernadero natural, con gran potencialidad de producción de biomasa; en cambio, la baja fertilidad de los suelos, la lixiviación de los nutrientes y la fuerte acidez ($H^+ + Al^{+++} = 2,90 \text{ cmol}(+)kg^{-1}$) para el horizonte Ap se constituyen en sus principales limitaciones (Valarezo *et al.*, 2010).

Por otro lado, el incremento en la concentración del CO₂ en la atmósfera, viene provocando la intensificación del efecto invernadero, lo que se traduce en un aumento de la temperatura mundial promedio o calentamiento global, denominado *Cambio Climático Antropogénico*. Entre las fuentes principales de emisión de este gas se mencionan la quema de combustibles fósiles en los países desarrollados; así como la deforestación y el cambio de uso de la tierra para ganadería o agricultura en los países tropicales (IPCC, 2007). Es entonces necesario conocer la capacidad de fijación de carbón vía la fotosíntesis en diferentes especies arbóreas.

1.2. Formulación del Problema.

No se han generado soluciones para la recuperación productiva de los suelos del ambiente de ladera del corredor fluvial Zamora - Nangaritza, en la zona sur de la región amazónica ecuatoriana, degradados por la ganadería (ácidos y bajos en nutrientes).

1.3. Sistematización del Problema o Interrogantes.

El reto de aplicar carbón vegetal, cal y nutrientes como opción para la recuperación productiva de los suelos degradados del ambiente de ladera, en un sitio representativo de los suelos desarrollados sobre granodiorita del gran batolito de Zamora, conduce a formular los siguientes interrogantes:

- ¿Cuáles son las características físico-químicas y de fertilidad actual y potencial de un suelo desarrollado sobre granodiorita del gran batolito de Zamora, degradado por la ganadería, en un sitio representativo en el corredor fluvial Zamora - Nangaritza?.
- ¿Cuál será el efecto de la aplicación de carbón vegetal, cal y nutrientes minerales, sobre el crecimiento en su etapa inicial de dos especies arbóreas maderables indicadoras (*Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum*), en el suelo representativo seleccionado del cantón Zamora de la zona sur de la región amazónica ecuatoriana?.

- ¿Cuál será la incidencia de la aplicación de carbón vegetal, cal y nutrientes minerales sobre las condiciones físico-químicas del suelo, la disponibilidad de nutrientes y las reservas C y de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn y Zn, en el suelo representativo seleccionado?.
- ¿Qué cantidad de carbono se almacenará en la fase inicial de crecimiento de las dos especies arbóreas maderables indicadoras (*Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum*), en el suelo representativo seleccionado, por efecto de la aplicación de carbón vegetal, cal y nutrientes minerales?.

1.4. Objetivos de la Investigación.

1.4.1. Objetivo General.

Generar alternativas para la repoblación forestal de las áreas degradadas por efecto de la ganadería, en el marco de una gestión sostenida de la fertilidad de los suelos.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- 1) Determinar el efecto de las enmiendas de carbón vegetal, cal y nutrientes minerales, sobre el crecimiento en su etapa inicial de las especies arbóreas maderables (*Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum*), en un suelo seleccionado del cantón Zamora de la zona sur de la región amazónica ecuatoriana.
- 2) Evaluar el efecto de la aplicación de carbón vegetal, cal y nutrientes minerales sobre las condiciones químicas del suelo, la disponibilidad de nutrientes y las reservas C y de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn y Zn, en el suelo en estudio.
- 3) Evaluar el almacenamiento de carbono en la fase inicial de la plantación de árboles maderables con enmiendas de carbón vegetal.

1.5. Justificación de la investigación.

La degradación creciente de los suelos por efecto de la ganadería en el ambiente de ladera del corredor fluvial Zamora - Nangaritza es un problema social,

económico y ambiental, por lo que es indispensable generar alternativas para la repoblación forestal de estas áreas, en el marco de una gestión sostenida de la fertilidad de los suelos. Para ello, se propone probar una combinación de enmiendas de carbón vegetal, cal, y nutrientes, bajo la hipótesis de que el carbón vegetal retendría en forma aprovechable tanto los nutrientes aplicados como los liberados por mineralización de la materia orgánica, disminuiría la lixiviación de los nutrientes por efecto de la abundante lluvia, y proveería a la planta los nutrientes en forma continuada a lo largo de toda su vida; por su parte la cal, neutralizaría el aluminio tóxico. Todo ello se traduciría en un crecimiento más acelerado de la planta, una mayor producción de madera y biomasa en general, concomitantemente con una importante captura de CO₂, con directo beneficio económico y ambiental para los productores y para la zona en su conjunto.

1.6. Alcance de la investigación.

La investigación consistió en la implementación de un experimento en un suelo desarrollado sobre granodiorita del gran batolito de Zamora, representativo del ambiente de ladera del corredor fluvial Zamora - Nangaritza. El trabajo de campo y de laboratorio comprendió la descripción de los perfiles de suelos de cada bloque experimental y la toma de muestras de los horizontes para los análisis físicos, químicos y de fertilidad en el laboratorio, en la perspectiva de conocer las características físicas, químicas y de fertilidad. También el registro de los parámetros de crecimiento de las especies arbóreas, y la toma de muestras de suelo de los diferentes tratamientos en las capas 00 – 25 cm y 25 - 50 cm para su correspondiente análisis de laboratorio. Finalmente, la cuantificación de la biomasa seca y su correspondiente contenido de carbono.

Consecuentemente, los resultados obtenidos fueron:

- Información sobre el efecto del carbón vegetal, en combinación con nutrientes minerales y cal, sobre el crecimiento de las especies arbóreas maderables (*Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum*) en suelos provenientes de granodiorita en el sur de la amazonia ecuatoriana.
- Información sobre la incidencia del carbón vegetal sobre las condiciones

químicas del suelo, la disponibilidad de los nutrientes y las reservas C y de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn y Zn, en plantaciones de especies arbóreas maderables (*Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum*), en los suelos del pie de monte del sitio La Victoria-Zamora.

- Información sobre la captura de CO₂ por las especies arbóreas maderables (*Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum*) y el aporte de C al suelo, para los factores fertilización y dosis de carbón vegetal, en el sitio La Victoria-Zamora
- El experimento servirá de escenario para la discusión *in situ* con investigadores nacionales e internacionales, profesionales de diferentes instituciones de desarrollo y productores en general, sobre los aspectos conceptuales, metodológicos y los resultados de la investigación y su relevancia para el desarrollo de la zona; así como, para procesos de educación continua relacionados con la temática y el fortalecimiento de la formación de los estudiantes de las carreras afines de la Universidad Nacional de Loja (UNL) y de otras universidades del país.

CAPÍTULO II

MARCO DE REFERENCIA.

2.1 Investigaciones relacionadas con el tema.

Investigaciones recientes (Glaser *et al.*, 2002b), han demostrado que en los suelos antropogénicos, el carbón vegetal puede mantener altos niveles de materia orgánica y de nutrientes aprovechables para las plantas. En los suelos ácidos, la aplicación de carbón vegetal incrementa el pH y disminuye la saturación de Al, factores que a menudo constituyen las principales limitaciones de la productividad de los cultivos en los suelos altamente meteorizados de los trópicos húmedos (Cochrane y Sánchez, 1980; Mgagwu y Piccolo, 1997); pero, no solamente incrementan el contenido de nutrientes, sino también la retención de éstos, lo cual es especialmente importante en los suelos mencionados, que tienen baja capacidad de retención iónica (Glaser *et al.*, 2002b).

El carbón vegetal ha sido exitosamente utilizado para el mejoramiento de los suelos (Berkowitz *et al.*, 1970; Cochrane y Sánchez, 1980; Mgagwu y Piccolo, 1997). Chidumayo (1994), en Alfisoles y Ultisoles de Zambia, reporta, entre siete plantas nativas maderables que en los suelos tratados con carbón vegetal se obtuvo mejor germinación de las semillas (incremento de 30 %), mayor altura de brotes (24 %) y mayor producción de biomasa. Kishimoto y Sugiura (1985) después de cinco años de la aplicación de 0,5 t ha⁻¹ de carbón vegetal, encontraron incrementos en la altura de los árboles de *Cryptomeria japonica* en 26 % a 35 %; así como, un aumento en la producción de biomasa en 2,31 a 2,36 veces. Se reporta, así mismo, que el rendimiento de los cultivos se puede incrementar aún más, cuando la aplicación de enmiendas de carbón vegetal va acompañada de fertilizantes y abonos orgánicos (Chidumayo, 1994; Glaser *et al.*, 2002b).

En los suelos Terra Preta do Indio (suelos de color negro, fértiles, siendo el carbón vegetal el origen de su mayor fertilidad, suelos antropogénicos), la lixiviación y la cristalización de los nutrientes es retardada por la fuerte formación de quelatos, que son complejos de ácidos húmicos con iones metálicos

(Kishimoto y Sugiura, 1985), lo cual se ha observado también en los suelos que se les ha aplicado carbón vegetal (Glaser *et al.*, 2002a). Se asume que la lenta oxidación (biótica y/o abiótica), en los bordes de la cadena aromática del carbón vegetal, que contiene grupos carboxílicos, es la responsable tanto de la posible formación de complejos órgano-minerales, como del incremento sustancial de la capacidad de intercambio catiónico (Glaser *et al.*, 2002b).

Adicionalmente, el carbón (C) pirogénico (carbón vegetal) es muy resistente a la degradación microbiana, persistiendo en el medio ambiente a través de siglos, debido a la estabilidad química proveniente de su estructura aromática (Lehmann *et al.*, 2002; Bechtold, 2002; Goldberg, 1985). Por lo tanto, el aporte de carbón vegetal para mejorar la fertilidad, podría conducir a un mayor secuestro de C y constituirse en un sumidero de CO₂ de largo plazo (Glaser *et al.*, 2002b).

Urrego, en el 2004, en un ensayo de crecimiento y rendimiento de *Gmelina arborea*, en Colombia, evaluó la productividad potencial a los tres años de edad, concluyendo que la variación de la altura y del volumen de madera fueron el resultado de la diferencia en la textura del suelo y drenaje natural, correspondiendo las parcelas más productivas con 37 m³ ha⁻¹ año⁻¹ y 31 m³ ha⁻¹ año⁻¹ a suelos franco arcillosos (CIC 46,4 - 49 cmol (+) kg⁻¹ de suelo y precipitación de 1000 mm y 1300 mm, respectivamente) y el sitio de menor productividad con 15 m³ ha⁻¹ año⁻¹ a un suelo arcilloso (CIC 4,28 cmol (+) kg⁻¹ de suelo , mal drenado y con precipitación de 2000 mm.

2.2 Marco Teórico.

2.2.1 Funciones protectoras y ambientales del bosque.

Gottle y El-Hadji (1997), sostienen que el bosque, es un amortiguador natural, mantiene el equilibrio ecológico, siendo al mismo tiempo un elemento clave en el paisaje y un suministrador de materias primas y diversos servicios protectores a las sociedades.

Los árboles favorecen la infiltración del agua lluvia, consecuentemente reducen la erosión, y aportan a procesos de limpieza del agua natural; atenúa el viento, la densa red de raíces mantiene fijo el suelo y reduce el movimiento de tierras; los

bosques influyen sobre la circulación local del aire y pueden, así, retener las suspensiones sólidas y los elementos gaseosos, así como filtrar las masas de aire y retener los contaminantes; y, el bosque ofrece un hábitat a la flora y la fauna, así como funciones recreativas y de curación.

2.2.2 Suelos del trópico húmedo y de la zona sur de la amazonia ecuatoriana.

2.2.2.1. Características generales de los suelos del trópico húmedo.

Los suelos del trópico húmedo cubren alrededor del 25 % de la superficie terrestre y en el Ecuador ocupan el 52 % de su territorio, su mayor parte se encuentra en la región amazónica y nor-occidente del país, que corresponde a la provincia de Esmeraldas (Valarezo, 2004a).

Según Sys citado por Valarezo (2004a), los suelos del trópico húmedo se forman en un ambiente de meteorización ferralítica, que ocurre en un clima con precipitación anual > 1200 mm y temperatura media mensual > 22°C (isohipertémico), con vegetación que corresponde al bosque húmedo tropical. El régimen de humedad del suelo es údico. El proceso principal de formación de suelos ferralíticos es la ferralitización, que consiste en una acumulación residual de óxidos de hierro y aluminio, producto de la intensa meteorización de los minerales primarios.

En el proceso de meteorización ferralítica, se reconocen tres estados de formación: reciente, intermedio y avanzado. El estado reciente se caracteriza por una elevada actividad de las arcillas y una alta reserva mineral; el estado intermedio, la actividad de las arcillas es de media a baja; y, el estado avanzado se caracteriza por arcillas de baja actividad, pobres en nutrientes, de colores rojos a amarillos, sus limitaciones nutricionales incluyen una generalizada toxicidad de Al^{+++} y una fuerte adsorción de P.

2.2.2.2. Los suelos del trópico húmedo formados a partir de granodiorita.

La granodiorita es una roca ácida constituida por cuarzo y feldespatos, pero contrariamente al granito, contiene más plagioclasas que ortosa. Los minerales secundarios son biotita, anfíbol y piroxeno. Los porcentajes de composición de la granodiorita con respecto al total de sus componentes son: cuarzo 10 % a 35 %, feldespato 20 % a 40 %, plagioclasas 25 % a 45 %; y, otros 10 % a 30 % (moscovita, biotita, piroxenos y anfíboles); sin embargo, las plagioclasas y los feldespatos son difíciles de distinguir a simple vista, por lo que no hay diferencia aparente entre un granito y una granodiorita (Galán, 1982).

El material parental tiene una gran influencia, sobre las características finales de los suelos del trópico húmedo. Las rocas ígneas y metamórficas ácidas (granito, granodiorita, riolita, gneis) generan suelos dominados por arcillas de color rojo a amarillo rojizo, con la presencia de granos gruesos de cuarzo. En un primer estado, la roca se transforma en un material arenoso grueso (Valarezo, 2004a).

2.2.2.3. Suelos de la zona sur de la amazonia ecuatoriana.

En el corredor fluvial Zamora-Nangaritza, el estado de meteorización ferralítica de los suelos (desarrollo del perfil, fertilidad potencial y actual), guarda estrecha relación con la forma del relieve, lo que a la vez está vinculado a la edad del material parental y las condiciones de drenaje. Así, los suelos en estado reciente sin desarrollo del perfil (Fluvents de color pardo) se encuentran en los valles aluviales; los suelos en estado intermedio (Inceptisoles) de color pardo amarillento, en las terrazas antiguas y en el pie de monte; y, los suelos en estado avanzado (Ultisoles de color rojo amarillento) en las laderas de las colinas y montañas (Valarezo, 2004a).

2.2.3 El carbón vegetal en el mejoramiento de los suelos del trópico húmedo.

En la amazonia brasilera, en Oxisoles de baja fertilidad, donde el bosque natural ha sido reemplazado con cultivos, se encuentran pequeñas áreas dispersas cuyos suelos no presentan el color rojo de los Oxisoles, sino son de color negro. Estos

suelos se los conoce con el nombre de Terra Preta do Indio. Son suelos más fértiles; los científicos han determinado el origen de su mayor fertilidad, en el carbón vegetal, donde los nativos pre-colombinos, tumbaron el bosque, enterraron la biomasa y la quemaron; la combustión incompleta de la biomasa, debido a la falta de oxígeno, produce carbón vegetal. Después de 1500 años, estos suelos todavía son fértiles (Lotter, 2002).

2.2.4 La acidez y su control en los suelos del trópico húmedo.

Espinoza (2010), indica que los minerales arcillosos de los suelos tropicales rojos (Ultisoles y Oxisoles), que han sufrido un proceso severo de meteorización, son estables hasta valores de pH 5,0, encontrándose el Al fijo en la partícula de arcilla y no amenaza el crecimiento de la planta, hasta que el pH del suelo desciende a valores donde los óxidos, hidróxidos y la caolinita se disuelven y liberan Al a la solución del suelo, por lo que es aconsejable elevar el pH a valores de alrededor de 5,5, lo que permite la precipitación del Al e incrementa apreciablemente la CIC (suelos de carga variable). Este incremento en pH es suficiente para el adecuado crecimiento y rendimiento de los cultivos.

Sys (1979) citado por Valarezo (2004b, p.31), para cuantificar el requerimiento de CaCO_3 en los suelos del trópico húmedo recomienda tomar en consideración el contenido de materia orgánica (MO) y de Al^{3+} .

También Espinoza (2010), indica que en este tipo de suelos, mientras más alta sea la saturación de bases, mayor es la fertilidad y mayores los rendimientos; de estos conceptos surge el método para determinar los requerimientos de cal, donde considera la saturación de bases a la cual se desea llevar al suelo con la aplicación de la enmienda. La experiencia brasileña en el cafeto señala que se debe llevar al suelo a una saturación de bases del 60 % para rendimiento óptimo. En otras palabras, el cafeto puede crecer satisfactoriamente hasta con una saturación de 40 % de Al^{3+} en la fase de intercambio (Espinoza, 2010).

Valarezo (2004b), señala que un sobre encalado en los Oxisoles y Ultisoles es muy peligroso, por cuanto existe una disminución de los rendimientos, deterioro

de la estructura del suelo y reducción de la disponibilidad de P, B, Zn y Mn. La deficiencia de P por el sobre encalado en los suelos con alta capacidad de fijación de fósforo es atribuida a la formación de fosfatos de calcio insoluble. En conclusión el manejo de la acidez de los suelos del trópico húmedo debería orientarse a: 1) neutralizar el Al^{3+} mediante encalado, sin sobrepasar de pH 5,5; 2) seleccionar especies más tolerantes al Al^{3+} ; y, 3) promover prácticas que permitan promover una penetración más profunda de las raíces en el subsuelo ácido.

2.2.5 El cambio climático global y su mitigación.

El panel intergubernamental de expertos sobre cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define el cambio climático como cualquier cambio del clima en el transcurso del tiempo ya sea en forma natural o como resultado de las actividades humanas (IPCC, 2007); mientras que la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC) define como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

2.2.5.1. El cambio climático, causas y consecuencias.

El cambio climático tiene como causa principal el incremento de gases de efecto invernadero (GEI) generado mayoritariamente por las actividades humanas: la quema de combustibles fósiles, la ganadería, la deforestación, el cambio de uso del suelo, etc. (IPCC, 2007).

Además, se indica que los GEI atrapan la radiación solar de onda larga causando un efecto de calentamiento gradual alrededor de la tierra, una vez que éstos llegan a la atmósfera no desaparecen, permaneciendo durante décadas.

La vegetación dentro de los ecosistemas es de suma importancia para el ciclo global del carbono (C), por que almacena grandes cantidades de éste en su estructura y en el suelo, y lo intercambia con la atmósfera mediante los procesos de fotosíntesis, respiración y descomposición. Sin embargo, la misma vegetación constituye fuente de carbono para la atmósfera cuando sufre alteraciones

provocadas por el hombre o por causas naturales; por ejemplo, actividades de conversión de bosque a otros usos no forestales (Ramírez *et al.*, 1999). La tala y quema de las masas forestales, permite la liberación del C almacenado en la biomasa y con la degradación de los suelos se libera parte del C almacenado en el mismo. Pero, por otro lado, los bosques en crecimiento se convierten en sumideros de C al registrar una absorción neta de CO₂ de la atmósfera en la biomasa y en el suelo.

El hombre puede mediante el ordenamiento forestal, modificar la magnitud de las reservas de C e inducir cambios en su circulación (flujo), alterando así la función de tales reservas en el ciclo del C y posiblemente afectando el clima de forma positiva (Brown, 1997).

Del mismo modo, todas las plantas y animales realizan el proceso de respiración, el cual causa disminución del O₂ e incremento del CO₂ atmosférico (Hall y Rao, 1994). Cuando una planta o una parte de ella mueren, el C fijado en los tejidos es liberado a la atmósfera en forma de CO₂ por medio del proceso de descomposición o mineralización (Finegan y Delgado, 1997).

La deforestación y otros cambios en el uso del suelo, constituyen una fuente significativa de CO₂ atmosférico. La magnitud de esta fuente adicional es comúnmente estimada de 8 % a 47 % de la que se produce de los combustibles fósiles (Brown, 1997; Alexander *et al.*, 1998). La deforestación contribuye al aumento del CO₂ en la atmósfera de dos formas: disminuyendo la cobertura vegetal capaz de fijar C atmosférico, y por la liberación de CO₂ a la atmósfera a través de la quema y descomposición de la biomasa, incluida parte de la materia orgánica del suelo (Hall y Rao, 1994). Todo esto es una demostración de que el incremento de CO₂ en la atmósfera, no es solamente por efecto de la intervención humana en la industria o transporte, sino por actividades humanas en la agricultura y fundamentalmente por cambios en el uso del suelo.

Los países en vías de desarrollo están más amenazados a los impactos del cambio climático, por cuanto presentan menos capacidad de resistencia a los riesgos climáticos. En la región del pacífico ecuatorial predicen que la

precipitación anual se incrementará en un 20 % (Bates *et al.*, 2008, citado Aguirre y León, 2010).

El cambio climático en el Ecuador, en el período 1960 - 2006, se evidencia en el incremento de la temperatura en 0,8 °C, la precipitación anual en un 33 % en la región litoral y en un 8 % en la región interandina; la cubierta de los glaciares ecuatorianos entre los años 1997 y 2006, se han reducido en un 27,8 % (Cáseres y Núñez, 2011).

2.2.5.2. Evolución de las emisiones de GEI en Ecuador.

Cáseres y Núñez (2011) en el estudio de cambio climático en el Ecuador durante cuatro años (1990 y 2006) determinaron la evolución sectorial de las emisiones GEI y por tipo de gas. Indicando que el sector agrícola es el que más aporta a las emisiones totales, seguido por el sector uso de la tierra, cambio de uso y silvicultura (USCUSS) y en menor escala por los sectores de energía, desechos y procesos industriales.

El sector agrícola fue el mayor generador de (N_2O), las emisiones variaron de 151 590 kt CO_2 -eq a 201 581 kt CO_2 -eq, debido al incremento de animales, aumentando las emisiones, por fermentación entérica y manejo del estiércol. El segundo es el CO_2 pasando de 98 069 kt CO_2 -eq a 188 974 kt CO_2 -eq, el sector USCUSS es el mayor generador de CO_2 , por la conversión de bosques y pastizales a otros usos y el transporte en el sector energía. El CH_4 es el tercer GEI, existiendo una disminución, debido a la reducción de animales. El sector agrícola es la fuente principal de las emisiones de monóxido de carbono, producto de la quema de los residuos agrícolas, seguido por el sector USCUSS, por la conversión de los bosques a pastizales.

2.2.5.3. Mitigación sector uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura.

Cáseres y Núñez (2011), señalan que el Ecuador, como una de las partes (de los países en vías de desarrollo) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático y del Protocolo de Kioto, no tiene compromisos

obligatorios de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, un importante número de acciones nacionales voluntarias de mitigación han sido desarrolladas, con base a la Constitución del Ecuador.

En general, el marco institucional, político y legal relacionado con el sector USCUS, históricamente ha sido débil y caracterizado por insuficientes procesos integrales de planificación y comunicación entre las diferentes instancias relacionadas con el sector.

El Ministerio del Ambiente se encuentra desarrollando varias iniciativas, para la definición del escenario de referencia de emisiones por deforestación y posteriormente como insumo para la definición de un sistema de monitoreo de emisiones de gases de efecto invernadero por deforestación.

Otra actividad relacionada con la mitigación en el sector forestal es la Propuesta de Estrategia para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD). La REDD representa una oportunidad para crear un sistema que incluya todas las principales fuentes de emisión, incluyendo la deforestación y degradación forestal. En el Ecuador existe incertidumbre sobre el desarrollo de las actividades REDD+, por el tema de los derechos de carbono, por cuanto en la Constitución establece que los servicios ambientales no son susceptibles de apropiación. Por otra, el gobierno promueve el pago a personas y comunidades por la conservación de sus bosques. El país ha definido acciones para implementar una estrategia REDD Nacional en las áreas de control forestal, gestión de sistemas de información, monitoreo de GEI, regularización de tierras en áreas forestales y manejo sustentable de bosques, así como la construcción de marcos legales e institucionales (Cenamo *et al.*, 2011).

2.2.5.4. Almacenamiento y fijación de carbono, el papel de los sumideros.

Otras actividades de uso del suelo que pueden contribuir a este fin son: la conservación del bosque en peligro de deforestación, rehabilitación de bosques, reforestación y agroforestería (Duncan *et al.*, 1999; Fisher y Trujillo, 1999). La alternativa más viable de ampliación de sumideros de GEI es la forestación. Las variables a considerar para elevar al máximo la fijación de C incluyen: las

especies de árboles a plantar, sus tasas de crecimiento y sus longevidades, las características del sitio a forestar, los períodos de rotación, la rotación y uso de los productos forestales a extraer.

El almacenamiento y la fijación de C son servicios ambientales de los sistemas forestales y agrícolas. La fijación de C se genera en la fotosíntesis, que capturan el CO₂ de la atmósfera, producen carbohidratos, liberan oxígeno y fijan C en la biomasa de los árboles. Los bosques tropicales, las plantaciones forestales y los sistemas agroforestales, pueden cumplir la función de “sumideros de carbono” (Cuellar *et al.*, 1999), así, como los suelos agrícolas, cuya capacidad de almacenar C está relacionada con el contenido de materia orgánica (Veldkamp, 1993; Ramos, 2003).

Herrero *et al.*, (2011), cuantificaron el C en el suelo y en el mantillo en pinares y rebollares del norte de España, y encontraron que hasta 60 cm de profundidad es similar el suelo de pinares y rebollares (53,0 t ha⁻¹ y 60,3 t ha⁻¹, respectivamente), mientras que el contenido en el mantillo es significativamente mayor en los pinares (13,7 t ha⁻¹ C) que en los rebollares naturales (5,4 t ha⁻¹ C). Los autores enfatizan que en el rebollar el C del suelo representa el 84 % del total fijado en el ecosistema y concluyen que el C en el suelo se correlacionó positivamente con la precipitación anual y la presencia del rebollo en el rodal.

Da Silva *et al.*, (2011), manifiesta que existen pocos estudios que expliquen la dinámica del C en los bosques y además, señalan que la mayoría tratan de calcular el C incorporado en la biomasa de los árboles, pero no el almacenamiento del C en el suelo. Evaluaron el almacenamiento de C en suelos con diferentes coberturas, en dos cuencas con características distintas en ocupación en el Estado de Sao Paulo (Brasil). Los resultados mostraron diferencias significativas en el almacenamiento de C en el suelo urbano, respecto a la cuenca rural.

Callo-Concha *et al.*, (2001), en un estudio sobre la cuantificación de C secuestrado en la Amazonía del Perú, en seis sistemas agroforestales: bosque primario, bosque secundario, café bajo sombra, silvopastura, pastura y huerto

casero, determinaron que en el bosque primario es de 466 t ha^{-1} , supera en 58% a los SAF's: huerto casero y café + sombra, 58 % a silvopastura y el 80 % a la pastura (testigo). La diferencia de C secuestrado se debe exclusivamente a la proporción de la cobertura generada por la biomasa arbórea.

Acosta *et al.*, (2001), señalan que la estimación del C almacenado en el suelo no es fácil de cuantificar; esta es necesaria conocer, para entender la distribución y la importancia relativa de los almacenes aéreos y subterráneos de C en los ecosistemas terrestres. Los autores, concluyen que el gran almacén de C en el componente subterráneo de los sistemas de vegetación está en el suelo mineral, la contribución de las raíces al total del C acumulado es inferior al 5 %; la mayor cantidad de C asociado a las raíces se encuentran a una profundidad de 00 - 30 cm; y, los sistemas agrícolas contienen mayor cantidad de C en el suelo que los forestales secundarios degradados.

2.2.6 Especies maderables en el sur de la amazonia ecuatoriana.

La zona sur de la amazonia ecuatoriana, posee una diversidad de especies de plantas maderables: romerillos (*Podocarpus*), pituca (*Clarisia racemosa*), canelo (Nectandra), almendro (*Platimiscium pinnatum*), seique (*Cedrellinga cataeniformis*), bella maría (*Vochysia guianensis*), cedro (*Cedrela odorata*), guararo (*Lafoensia acuminata*), porotillo (*Tabebuia crysanta*), etc (Aguirre y León, 2010). Por la deforestación y ampliación de la frontera agrícola, existen pocas especies con alto valor comercial: yumbingue (*Terminalia amazonia*), cedro y almendro.

2.2.6.1. Melina (*Gmelina arborea*) y Pachaco (*Schizolobium parahybum*): especies arbóreas maderables de rápido crecimiento.

El *Schizolobium parahybum* es un árbol leguminoso, originario de la amazonia, de rápido crecimiento, de fuste recto, alcanza hasta 22 m de altura y diámetro a la altura del pecho (DAP) de alrededor de 1 m. Su madera es de densidad baja (400 kg m^{-3}), pero tiene diferentes usos (aglomerados, enlistonados, pulpa, y como medio de aislamiento), aporta N al suelo y por su rápido crecimiento contribuye a

la captura de CO₂. Se puede cultivar en plantaciones puras o en sistemas agroforestales. La industria maderera nacional utiliza el pachaco en la elaboración de tableros contrachapados y pulpa para tableros de fibra¹.

La *Gmelina arborea* es un árbol originario de la India, bajo condiciones adecuadas es una de las especies de mayor crecimiento en el mundo. El follaje es apetecido por los animales, sus flores son melíferas, las hojas, frutos y la corteza se utilizan con fines medicinales, produce carbón de elevado poder calorífico, su turno para pulpa y madera es de 5 a 6 y 12 años, respectivamente. Es una madera blanda, con una densidad de 580 kg m⁻³ (Vinueza, 2012).

En el Ecuador se han venido estableciendo plantaciones en Santo Domingo, Quevedo y Quinindé (CORMADERA, 2002), que son utilizados para pallets y por sus características de grano recto, textura fina y la presencia de veteado, constituye la materia prima para fabricar muebles². Kojima *et al.*, (2009) señalan que la melina ha recibido mucha atención como fuente de pulpa de buena calidad, fibra de densidad media (MDF) y madera contrachapada, debido a su hermoso color blanco y fibra más fuerte. También tiene potencial como madera para edificios.

2.3 Marco conceptual ó (definición de términos básicos).

Anfibol: Son metasilicatos de calcio, magnesio y hierro. La unidad estructural fundamental de los anfíboles es el tetraedro de silicio y oxígeno (SiO₄) enlazado en forma de largas cadenas dobles.

Biocarbón: Carbón vegetal producido a partir de la quema de biomasa de árboles, que sirven para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelos.

Biotita (mica negra): Silicato de hierro y magnesio de color negro, marrón o verde oscuro. La composición media teórica es 33 % a 41 % de SiO₂, 12 % a 18% de Al₂O₃, 2 % a 24 % de MgO, 5 % a 25% de FeO, 1.5% de F.

Carbón pirogenico: Carbon negro, resultante de la quema incompleta de la biomasa, por acción natural o humana.

¹ H. Maza, comunicación personal

² H. Maza, comunicación personal

Cuarzo: Compuesto de dióxido de silicio (también llamado sílice, SiO_2), es un mineral muy estable que en la mayoría de los casos no es afectado por la meteorización. Es muy abundante en las rocas graníticas.

Caolinita: Se forma en un ambiente ácido, que implica la pérdida de cationes y el enriquecimiento con H^+ . La lixiviación de silicio debe ser lo suficientemente intensa de manera tal que el silicio sobrante no es suficiente para formar arcillas 2/1. En el caso de Ecuador, la formación de la caolinita tiene lugar en las regiones de trópico húmedo (ambiente de meteorización ferralítico) y en las partes húmedas y moderadamente húmedas de la Sierra sur.

CIC: La capacidad total de intercambio de cationes en el suelo es una expresión de la carga eléctrica negativa de los coloides mineral y orgánico del suelo.

CICE: Corresponde a las cargas del suelo que están disponibles para los procesos de intercambio. Estos espacios están siendo ocupados por los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ y Al^{3+} .

DAP: Diámetro a la altura del pecho, en un árbol medido a 1,30 m del suelo.

DB: Diámetro basal, diámetro medido de los árboles a 20 cm del suelo.

Eluviación: Movilización, transporte y pérdida de materiales que se presenta en los horizontes superiores del suelo, sobre todo en los horizontes E, pero también en los A.

Feldespato: Silicatos formados por una red tetraédrica de grupos SiO_2 con incorporaciones de Al^{3+} y presencia, en los espacios disponibles, de cationes Na^+ , K^+ o Ca^{2+} de manera a neutralizar las cargas. Los feldespatos más comunes pueden expresarse en función del sistema: ortoclasa (KAlSi_3O_8) - albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) - anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

Goethita: $\text{FeO}(\text{OH})$, este mineral, resulta de la meteorización oxidativa de los minerales primarios que contienen hierro, tiene una distribución muy importante en los suelos de las áreas tropicales húmedas (ferralíticos). Mayormente se presenta en forma de polvo pardo a rojizo, como películas o como concreciones, siendo excepcionales los cristales bien formados.

Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$): El hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$, denominado gibbsita o hidrargillita. Su estructura corresponde a una lámina de alúmina, o sea de octaedros de aluminio es común en los suelos evolucionados en un ambiente de

meteorización intensa; por ello, solamente se lo encuentra en los suelos del trópico húmedo.

Grupos carboxílicos: Se derivan de los ácidos carboxílicos, su fórmula general es R-COOH. Tienen propiedades ácidas. Los dos átomos de oxígeno son electronegativos y tienden a atraer a los electrones del átomo de hidrógeno del grupo hidroxilo con lo que se debilita el enlace, produciéndose en ciertas condiciones, una ruptura heterolítica cediendo el correspondiente protón o hidrón (H^+) y quedando el resto de la molécula con carga negativa debido al electrón que ha perdido el átomo de hidrógeno, por lo que la molécula queda como R-COO⁻.

Iluviación: Es la inmovilización y acumulación, o sea de ganancia o enriquecimiento de sustancias en los horizontes subsuperficiales del perfil del suelo (horizontes B), siendo siempre el agua el medio de transporte.

Inmovilización: la conversión de un elemento de su forma inorgánica a orgánica en microbios o tejidos vegetales.

Intemperización: Todos los cambios físicos y químicos producidos en las rocas, en o cerca de la superficie de la tierra por agentes atmosféricos.

Kandiudults: Suelos que pertenecen al orden de los Ultisoles, con régimen de humedad Údico, dominados por arcillas del tipo 1:1 (canditas).

Lixiviación: Proceso de empobrecimiento que sufre el suelo por efecto de la excesiva infiltración y percolación de aguas lluvias o de riego, perdiendo con esto parte de sus nutrientes.

Mineralización: la conversión de un elemento de una forma orgánica activa a un estado inorgánico como resultado de la descomposición microbiana.

Plagioclasa: Es un grupo de feldespatos que corresponden a la clase de silicatos aluminicos de sodio y calcio, variando las proporciones de estos elementos, los minerales principales son la albita y la anortita.

Piroxeno: Son silicatos monoclinicos de hierro y de calcio. De brillo vítreo, color negro o verde negruzco. Se encuentran en las rocas ígneas.

Régimen de Humedad Údico: El perfil del suelo no está seco hasta por 90 días acumulativos en los años normales. No se permite más de 45 días secos consecutivos. Corresponden a suelos de clima húmedo con buena distribución de la lluvia.

Sesquióxidos: Óxido que contiene tres equivalentes de oxígeno y dos de otro elemento, por ejemplo Fe_2O_3 , Al_2O_3 , trióxido de Fe o Al.

Terra preta do Indio: Suelos de color oscuro y fértil encontrado en la cuenca del río Amazonas. Estos se diferencian de los suelos rojizos o amarillentos (Oxisoles y Ultisoles). El carbón vegetal es el componente de estos suelos. Siendo un suelo formado por los nativos precolombinos.

Ultisoles: Suelos con un horizonte argílico o cándico y con saturación de bases < 35 %. Son suelos, ácidos fuertemente meteorizados y lixiviados. Presentan traslocación de arcillas e intensa lixiviación. La CIC es de moderada a baja.

2.4 Sistema de Hipótesis.

2.4.1 Hipótesis Específicas.

Ha. Las enmiendas de carbón vegetal + cal y la aplicación de nutrientes minerales incidirán sobre el crecimiento de las especies arbóreas maderables indicadoras melina y pachaco, en la etapa inicial.

Ha. El carbón vegetal retendrá en forma aprovechable los nutrientes aplicados y liberados por mineralización de la materia orgánica y disminuirá la lixiviación de estos por efecto de la abundante lluvia; por su parte, la cal neutralizará el aluminio tóxico; y, las especies arbóreas plantadas dispondrán en su fase inicial suficientes cantidades de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn y Zn.

Ha. Las enmiendas de carbón vegetal y la aplicación de cal y nutrientes minerales tendrán incidencia sobre el almacenamiento de carbono del suelo en la fase inicial de la plantación de árboles maderables.

2.5 Sistema de variables.

- Altura de planta, diámetro basal (DB) y diámetro a la altura del pecho (DAP).

Estas son variables que expresan el crecimiento de las especies arbóreas (pachaco y melina) en respuesta a la fertilización (aplicación de nutrientes + cal) y las dosis de biocarbon (0 t ha^{-1} , 3 t ha^{-1} y 6 t ha^{-1}).

- Contenidos totales de Ca, Mg,Na, K, Mn, Al, Fe, Zn, Si y Mo en el perfil del suelo y en la capa de 00 - 25 cm antes de la instalación del experimento.

Estos contenidos totales permiten establecer la situación de partida del experimento antes de la fertilización y plantación.

- Contenidos totales de Ca, Mg,Na, K, Mn, Al, Fe, Zn, Si y Mo en las capas 00 – 25 cm y 25 – 50 cm para los 12 tratamientos.

Los contenidos totales de Ca, Mg,Na, K, Mn, Al, Fe, Zn, Si y Mo en las capas 00 – 25 cm y 25 – 50 cm en muestras tomadas a los seis y 18 meses después de la fertilización y plantación, son variables que evidencian la evolución de las reservas de estos nutrientes en el suelo por efecto de la aplicación de los nutrientes, cal y carbón vegetal.

- Reacción del suelo, acidez cambiante, CIC, saturación de bases y disponibilidad de nutrientes en las capas 00 – 25 cm y 25 – 50 cm.

Son variables que evidencian la evolución a los seis y 18 meses de las condiciones químicas y de fertilidad del suelo en las unidades experimentales por efecto de la aplicación de los nutrientes, cal y carbón vegetal.

- Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa.

La cantidad de biomasa y contenido de carbono de las especies maderables en estudio y contenido de carbono orgánico en el suelo en las capas 00 - 25 cm y 25 – 50 cm, son variables para cuantificar la captura de CO₂ por las especies arbóreas y la variación del contenido de carbono en el suelo de las unidades experimentales por efecto de la aplicación de los nutrientes, cal y carbón vegetal.

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO.

3.1. La zona de estudio y el sitio experimental.

La zona de estudio corresponde a la red fluvial Zamora-Nangaritza, en el sur de la amazonia ecuatoriana, que fisiográficamente es un valle alargado y estrecho, con flancos de las cordilleras Real y El Cóndor, a ambos lados.

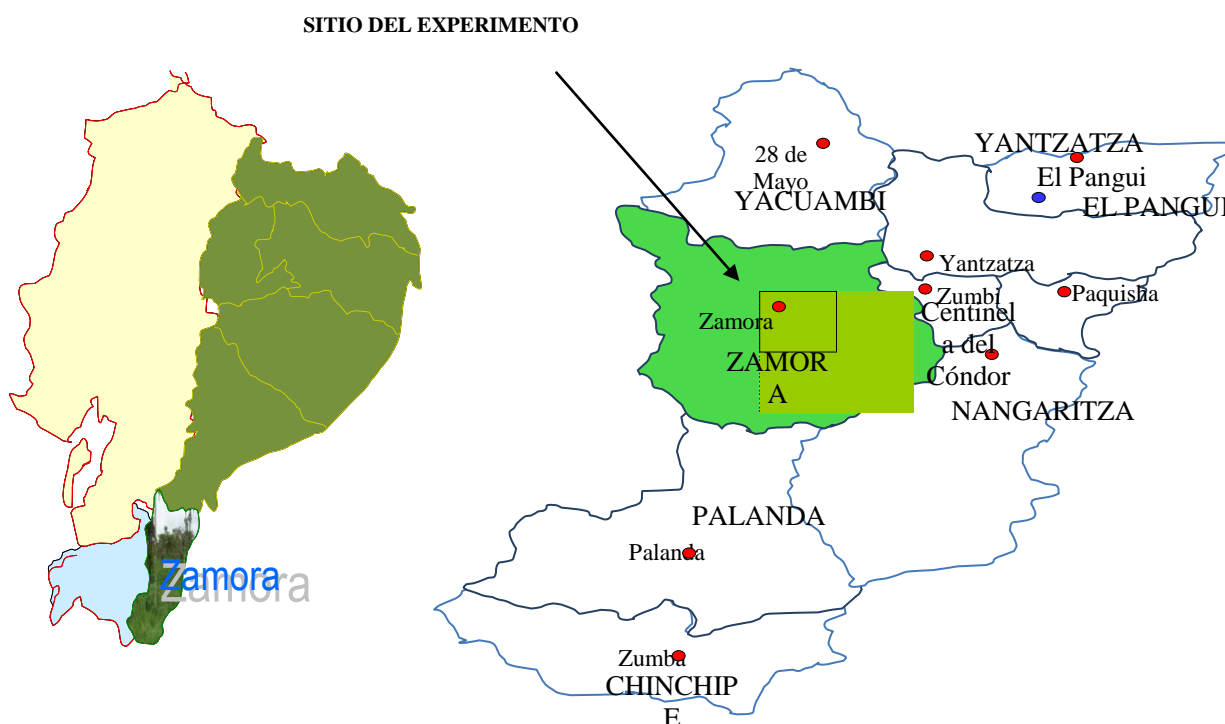


Figura 3.1. Ubicación del experimento en el sitio La Victoria, del cantón Zamora en la provincia de Zamora Chinchipe en el sur de la amazonia ecuatoriana.

El experimento fue ubicado en el sector La Victoria del cantón Zamora, en un terreno perteneciente a la Unidad “BS-62 Zamora”, del Ejército Ecuatoriano, que se encuentra a cinco kilómetros de la ciudad de Zamora, vía a Yanzatza (Figura 3.1), entre las coordenadas 9 552 541 y 9 552 562 E; y, 07 30436 y 07 30492 N; y en un rango de altitud de 949 msnm a 964 msnm. El paisaje corresponde a pie de monte, el tipo de relieve es una vertiente y la forma del terreno es una ladera moderadamente escarpada, con 15 % de pendiente. Geológicamente se asienta en el gran Batolito de Zamora, de alrededor de 1800 km², que se presenta como un cuerpo alargado en dirección NNE-SSW, compuesto de leuco granodioritas y

granodioritas hornbléndicas, sin clastos (piedras) en la superficie ni afloramientos rocosos (Instituto Ecuatoriano de Minería, 1989).

A partir de la información que reporta el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), para el periodo de registro de 1970 a 1993 de la estación meteorológica de Zamora, situada a 970 msnm, se derivan las siguientes características del clima: temperatura media mensual 22,0 °C; mínima 20,8 °C y máxima 22,6 °C, la precipitación media anual es de 1945 mm, con un rango entre 1865 mm a 2314 mm; y, la humedad relativa media mensual es de 88 % (Valarezo *et al.*, 2010).

3.2. Materiales y Equipos.

- Plántulas de *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum*.
- Carbón vegetal elaborado de los siguientes árboles: 80 % tábano (*Casearia sp.* familia Flacourtiaceae) y 20 % de la mezcla de cashco (*Weinmania fagaroides*), canelo (*Nectandra laurel* Nees) y capulí (*Prunus opaca* (Benth.)Walp.), de la parroquia Jimbilla, del cantón Loja y molido en partículas menores a 0,5 cm.
- Cal agrícola (CaCO_3), con 95 % de pureza.
- Urea, superfosfato triple, sulpomag y sulfato de zinc.
- Elemental analyser. Modelo QLAB; marca PERKIN ELMER; 2008.
- Espectrofotómetro UV-V de absorción atómica. 2011. Modelo 6100VIS.
- Molino de martillos. Construcción artesanal
- Cilindros Kopecky. Marca Eijkelkamp.
- Equipo de succión: Modelo N° 1500G1 15-Bar Pressure plate extractor. Modelo N° 1600G1 5-Bar Pressure plate extractor y Modelo N° 0776160 connecting hose. 1998. Marca Eijkelkamp.
- GPS Garmin.

3.3. Diseño de la Investigación.

Corresponde a una investigación experimental.

3.3.1. Diseño experimental, factores en estudio, niveles y tratamientos.

Se evaluaron tres factores: dos especies arbóreas (melina y pachaco); dos niveles de la combinación de cal y fertilización (sin y con); y tres niveles de carbón vegetal (0 t ha⁻¹, 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹), según se presenta en el cuadro 3.1. Los tratamientos se muestran en el cuadro 3.2. El diseño experimental consistió en un arreglo en parcelas subdivididas (2x2x3), en bloques al azar, con doce tratamientos y cuatro repeticiones.

Cuadro 3.1. Factores y niveles del experimento.

Factores	
Especies arbóreas (A)	a1. pachaco, <i>Schizolobium parahybum</i> a2. melina, <i>Gmelina arborea</i>
Carbón Vegetal (C)	c1. 0 t ha ⁻¹ carbón vegetal c2. 3,0 t ha ⁻¹ carbón vegetal c3. 6,0 t ha ⁻¹ carbón vegetal
Cal y fertilización (F)	f1. 0 t ha ⁻¹ cal + 0 kg ha ⁻¹ de nutrientes f2. Cal (5 t ha ⁻¹), N (200 kg ha ⁻¹), P (150 kg ha ⁻¹), K (200 kg ha ⁻¹), Mg (118 kg ha ⁻¹), S (229 kg ha ⁻¹), Zn (40 kg ha ⁻¹).

Cuadro 3.2. Tratamiento del experimento

Nº Tratamiento	Factores		
	Especie arbórea	Fertilización	Carbón vegetal t ha ⁻¹
T1	Pachaco	Sin	0
T2	Pachaco	Con	0
T3	Pachaco	Sin	3
T4	Pachaco	Con	3
T5	Pachaco	Sin	6
T6	Pachaco	Con	6
T7	Melina	Sin	0
T8	Melina	Con	0
T9	Melina	Sin	3
T10	Melina	Con	3
T11	Melina	Sin	6
T12	Melina	Con	6

El modelo lineal aditivo aplicado en el experimento fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \rho_i + \alpha_j + \varepsilon_1 + \beta_k + (\alpha\beta)_{jk} + \varepsilon_2 + \gamma_l + (\alpha\gamma)_{jl} + (\beta\gamma)_{kl} + (\alpha\beta\gamma)_{jkl} + \varepsilon_3$$

Donde:

Y_{ijkl} = Una observación cualquiera bajo el efecto del Bloque (i); Especies arbórea (j); Nivel de fertilización (k) y Nivel de carbón vegetal (l) y sus interacciones.

μ = Media general del experimento.

ρ_i = Efecto aditivo de Bloque.

α_j = Efecto aditivo de especie arbórea.

ε_1 = Error experimental (a), para probar el efecto de las especies arbóreas.

β_k = Efecto aditivo del factor fertilizaciones.

$(\alpha\beta)_{jk}$ = Efecto de la interacción especie arbórea por fertilización.

ε_2 = Error experimental (b), para probar los efectos de fertilizaciones y la interacción fertilizaciones con especies arbóreas.

γ_l = Efecto de carbón vegetal.

$(\alpha\gamma)_{jl}$ = Efecto de la interacción entre especies arbórea con carbón vegetal.

$(\beta\gamma)_{kl}$ = Efecto de la interacción fertilización por carbón vegetal.

$(\alpha\beta\gamma)_{jkl}$ = Efecto de la interacción especies forestal con fertilización y carbón vegetal.

ε_3 = Error experimental (c) para probar el efecto del resto de factores e interacciones.

3.3.2. Especificaciones del experimento.

La distribución de las unidades experimentales se encuentra en el anexo 7.1.

- Número de repeticiones: 4
- Número de plantas por subparcela de melina: 16; total: 384
- Número de plantas por subparcela de pachaco: 16; total: 384
- Área de la parcela grande: 36 m x 24m = 864 m²
- Área de la parcela pequeña o unidad experimental 12 m x 12 m: 144 m²
- Área experimental: 6 912 m²

3.4. Métodos de investigación.

Se utilizó el método empírico (experimento); y, método teórico consistente en análisis, síntesis e inducción.

3.4.1. Evaluación de las condiciones físicas, químicas y la fertilidad actual y potencial del suelo.

3.4.1.1. Caracterización de la geología, geomorfología y material parental de los suelos.

La caracterización de la geología, la geomorfología y el material parental del suelo en el sitio del experimento, se realizó revisando las cartas de Zamora del mapa Geológico del Ecuador, escala 1:100 000 (Instituto Ecuatoriano de Minería DGGM, 1989); para luego, comprobar en el campo las formas del terreno (con el clinómetro) e identificar *in situ* la roca de la cual se había formado el suelo.

3.4.1.2. Descripción de perfiles de suelos y toma de muestras alteradas e inalteradas.

En cada uno de los cuatro bloques del experimento, se preparó una calicata de 1,2 m de profundidad, en la que se describió el perfil del suelo, siguiendo las normas contenidas en la “Guía y Claves para la Descripción de Perfiles de Suelos” de la FAO (1975). La designación de los horizontes y capas se realizó siguiendo la nomenclatura contenida en el USDA Soil Taxonomy (2010) (Anexo 7.2).

De cada horizonte o capa del perfil del suelo de los sitios experimentales se tomaron muestras disturbadas para los análisis físico-químicos de laboratorio (total 27 muestras) y en las cuales se determinaron los contenidos totales de Ca, Mg, K, Mn, Al, Fe, Zn Cu, Si y Mo (mediante digestión con HCl y HNO₃ y lectura en absorción atómica), el método digestión N° 3052 desarrollado por Environmental Protection Agency United States; así como, las cantidades disponibles de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn, (extracción con la solución de Olsen Modificada: NaHCO₃ + EDTA, a pH 8,5) (Olsen *et al.*, 1954). El N y P extraídos se determinaron mediante espectrofotometría UV – visible y todos los demás elementos por absorción atómica. La textura en el laboratorio se determinó mediante el método de Boyoucus, utilizando como dispersante NaOH + oxalato de sodio. La CIC con acetato de amonio 1 N pH 7,0 y generación de OH⁻ con

formaldehído. Las bases cambiables por absorción atómica. El pH_{H_2O} y pH_{KCl} (método potenciómetro), y la acidez cambiante ($Al^{+3} + H^+$) mediante titulación con NaOH 0,01 N, en extractos con KCl 1 N (método de Day).

Además, de las tres capas superiores del perfil, se tomaron por duplicado muestras inalteradas con cilindros Kopecky de 100 cm^3 de capacidad (24 en total), para la determinación de la densidad aparente.

3.4.1.3. Determinación de la infiltración básica

En cada bloque de los dos sitios experimentales, a una distancia de aproximadamente 1 a 2 m de cada perfil, se realizó por duplicado una prueba de infiltración (8 pruebas en total), mediante el método del doble anillo, durante el tiempo necesario hasta alcanzar la infiltración básica (4 horas).

Los datos obtenidos en el campo se procesaron en una hoja electrónica, los valores de K y n de la ecuación de Kostiakov: $I_{cum} = KT^n$ se obtuvieron a partir de graficar la curva de infiltración acumulada en escalas doble logarítmica. Se calcularon las velocidades de infiltración media e instantánea en cm/min para cada uno de los tiempos; así como, la velocidad de infiltración básica en cm/h, por regresión lineal.

3.4.2. Plantación de las especies maderables y aplicación de enmiendas.

3.4.2.1. Preparación del terreno, aplicación de los tratamientos y plantación.

En el sitio experimental se realizó el desbroce de la vegetación arbustiva y arbórea. A continuación, tomando como centro el punto señalado para la plantación de cada árbol, se trazó una circunferencia de 2,4 m de diámetro; donde se distribuyó uniforme y superficialmente la cal, los fertilizantes y el carbón vegetal, según el tratamiento correspondiente. Luego con la ayuda de una barreta, se incorporaron manualmente estos materiales hasta una profundidad de 25 cm. La remoción de suelo en el círculo señalado y hasta 25 cm se realizó también en los sitios de los árboles de las sub-subparcelas testigo (sin fertilización, ni carbón vegetal).

La dosis de carbonato de calcio (5 t ha^{-1}) se estableció a partir de los promedios ponderados del contenido de Al^{3+} intercambiable (extraído con KCl 1N) y de materia orgánica (método de Wakley Black), de las muestras tomadas de la capas superiores del suelo hasta 25 cm de profundidad, aplicando la siguiente relación: $2 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ de Ca^{2+} por cada $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ de Al^{3+} (Sys, 1979).

La fertilización consistió en la aplicación combinada de 200 kg ha^{-1} de N, 150 kg ha^{-1} de P, 200 kg ha^{-1} de K, 118 kg ha^{-1} de Mg, 40 kg ha^{-1} de Zn y 229 de S, cuyas dosis para cada planta y las fuentes de estos elementos se detallan en el cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Dosis de elementos aplicados por planta y fuentes utilizadas.

Elemento	kg ha^{-1}	g planta^{-1}	Fuente	Fórmula
N	200	182	Urea 46 %	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
P	150	136	Fosfato diamónico 18-46-0	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$
K	200	182	Sulpomag 0-0-22-18	$\text{MgK}_2(\text{SO}_4)_2$
Mg	118	107		
S	229	208		
Zn	40	36	Sulfato de Zinc 21,3%	ZnSO_4

Seguidamente, se procedió a la plantación de las especies maderables.

3.4.2.2. Registro del crecimiento y volumen de las especies arbóreas indicadoras.

Para evaluar el crecimiento de los árboles y la producción de biomasa se midieron tres variables: a) Altura de planta (m), es la distancia vertical entre el nivel del suelo y la yema terminal más alta del árbol. b) Diámetro basal del tallo (cm), medido a veinte centímetros del nivel del suelo. c) Diámetro a la altura del pecho o DAP es una medida estándar que se registra desde el nivel del suelo a una altura de 130 cm. Estas se registraron secuencialmente a los 190, 250, 300, 400, 540 y 720 días desde la plantación, excepto el DAP que se midió a los 720 días.

El volumen de los árboles se determinó a los 720 días para lo cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\pi}{4} \times DB^2 \times hf \times f$$

Donde:

V = Volumen del árbol (m^3); π = constante 3,1416; DB = Diámetro basal en (m)

hf = Altura de fuste (m); f = factor de forma: es la relación entre el diámetro basal (m) y diámetro altura de fuste (m) de cada especie.

3.4.2.3. Monitoreo de la evolución de las condiciones químicas y de fertilidad del suelo.

Al inicio, seis y 18 meses después de la plantación de las especies arbóreas, utilizando un barreno se tomaron muestras de suelo en las capas 00 - 25 cm y 25 - 50 cm, en el área tratada considerando cuatro plantas seleccionadas de la unidad experimental. Estas muestras fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Nacional de Loja, para monitorear las cantidades disponibles de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn y la evolución del pH_{H_2O} , acidez intercambiable (H^+ y Al^{+++}), CIC y bases intercambiables, por efecto de los tratamientos aplicados. La metodología de análisis fue la misma que se siguió en las muestras de los perfiles. En el caso de los contenidos totales, se realizó el análisis de las parcelas del bloque 1, considerado como representativo, en el Laboratorio de Suelos del Departamento de Geografía de la Universidad de Berna – Suiza.

3.4.3. Evaluación del carbono en el suelo y la biomasa.

3.4.3.1. Carbono en el suelo.

En las capas 00 - 25 cm y 25 - 50 cm, en las muestras tomadas al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización y plantación se determinó el contenido de CO (método de digestión húmeda de Walkley – Black). El carbono del suelo se cuantificó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Carbono del suelo (t ha}^{-1}\text{)} = \% \text{ CO} \times Da \times P \times 100$$

Donde:

CO = carbono orgánico (%); P = profundidad de muestreo (m); Da = densidad aparente ($t m^{-3}$).

3.4.3.2. Carbono en la biomasa.

Para la determinación de la biomasa de la copa se eligió por separado un árbol de melina y de pachaco por cada tratamiento en los bloques I y IV. En cada árbol se le realizó la poda total de ramas y hojas y se pesó esta biomasa. Además se registró la altura total y el diámetro de copa. Con estos valores se generaron las ecuaciones alométricas respectivas (Anexo 7. 3 y 7.4).

Seguidamente se tomó 1 kg de muestra de biomasa de cada tratamiento, la misma que en el laboratorio se procedió a secarla a 60 °C hasta peso constante. El factor resultante entre peso seco/peso húmedo, permitió transformar la biomasa húmeda a seca. Finalmente, de cada tratamiento, se tomó 1g de muestra finamente molida para el análisis y del contenido de carbono mediante pirolisis en el Elemental Analyser.

Para cuantificar el peso húmedo de la copa de los árboles de pachaco y melina a los 24 meses, se aplicaron las ecuaciones alométricas generadas, siendo necesario introducir en éstas el diámetro y la altura de copa.

El peso seco del fuste de los árboles se obtuvo mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$P = V \cdot Da \cdot ps / ph$, donde:

$P =$ peso del árbol kg

$V =$ volúmen del arbol m^3

$Da =$ Densidad aparente $kg\ m^{-3}$

$ps =$ peso seco de la submuestra g

$ph =$ peso húmedo de la submuestra g

Luego la biomasa del fuste y de la copa, se llevó 1 g de biomasa seca al laboratorio, a fin de determinar el contenido de carbono.

El contenido de carbono en la biomasa aérea ($t\ ha^{-1}$), se calcula mediante la fórmula:

$$C \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = p \times CO / 100, \text{ donde:}$$

C= Carbono biomasa aérea

p= Peso de la biomasa aérea (t ha⁻¹).

CO= % del contenido de carbono de la biomasa aérea.

3.4.3.3. Almacenamiento total de carbono.

La cantidad total de carbono almacenado (t ha⁻¹) corresponde a la suma del carbono en la biomasa aérea y en las capas 00 - 25 cm y 25 - 50 cm de suelo.

3.5. Métodos de investigación.

Empírico – experimental.

3.6. Población y muestra.

3.6.1. Población.

El número de unidades experimentales: 48

Número de plantas por unidad experimental : 16

Número de plantas en el experimento: 768

3.6.2. Muestra.

Registro del crecimiento de las especies arbóreas indicadoras.

Para el registro del crecimiento de las especies arbóreas en cada sub-subparcela, del total de los 16 árboles se midieron la altura total, el diámetro basal (DB) y el diámetro de altura al pecho (DAP) de los cuatro árboles centrales.

Monitoreo de la evolución de las condiciones químicas, de fertilidad y el contenido de C en el suelo.

En cada sub-subparcela y para cada capa (00 - 25 cm y 25 - 50 cm) se tomaron ocho submuestras de suelo (dos por cada árbol de registro), éstas se mezclaron uniformemente para constituir una muestra por unidad experimental, obteniéndose un total de 48 muestras de cada capa. En estas se determinó la

evolución de: las condiciones químicas, la disponibilidad de nutrientes y del carbono orgánico almacenado en el suelo.

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

La altura total de los árboles se registró con un hipsómetro electrónico; en tanto que para el DB y el DAP, se midió la circunferencia con una cinta métrica.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de los datos.

Los datos de las variables de altura total, DB, DAP y la evolución de las condiciones químicas, fertilidad, disponibilidad de nutrientes y la cantidad de carbono orgánico almacenado en el suelo, se realizó el análisis de la variancia (ADEVA) y la prueba de Tukey para las variables estadísticamente significativas, utilizando el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2008). El esquema del análisis de variancia se presenta en el cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Análisis de variancia para el diseño de parcelas subdivididas.

Fuentes de variación		Grados de libertad	
Parcela Grande:			
Factor A: especies arbóreas	(a-1)	(2-1)	1
Repeticiones	r-1	(4-1)	3
Error A	(a-1)(r-1)	(2-1)(4-1)	3
Subparcelas			
Factor B: cal + fertilización	(b-1)	(2-1)	1
Interacción A*B	(a-1)(b-1)	(2-1)(2-1)	1
Error B	a(r-1)(b-1)	2(4-1)(2-1)	6
Sub-subparcelas			
Factor C: carbón vegetal	c-1	(3-1)	2
A*C	(a-1)(c-1)	(2-1)(3-1)	2
B*C	(b-1)(c-1)	(2-1)(3-1)	2
A*B*C	(a-1)(b-1)(c-1)	(2-1)(2-1)(3-1)	2
Error C	(a-1)(r-1)	2x2(4-1)(3-1)	24
Total	abcr-1		47

3.9. Confiabilidad de validez de instrumentos.

Para asegurar la confiabilidad de validez de instrumentos, en la determinación de la altura total de los árboles con el hipsómetro electrónico, éste fue operado por

una sola persona en cada ocasión, previa a la comprobación de su confiabilidad con alturas conocidas.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Crecimiento de las especies arbóreas.

4.1.1. Altura de planta.

Se evidenció diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,01$) para el factor fertilización en todas las fechas de evaluación (190, 250, 300, 400, 540 y 720 días después de la plantación) y diferencia significativa ($p < 0,05$) para la interacción Fertilización x Especies arbóreas x Carbón vegetal a los 250 días, no hubo significancia estadística para el factor carbón vegetal, especies arbóreas y sus interacciones, en casi todas las fechas de muestreo (Anexo 7.5). El coeficiente de variación se presentó en el rango de 15,1 % a 16,2 %.

La evolución de la altura de planta por efecto de la fertilización en las seis fechas de registro se ilustra en las Figuras 4.1 (pachaco) y 4.2 (melina).

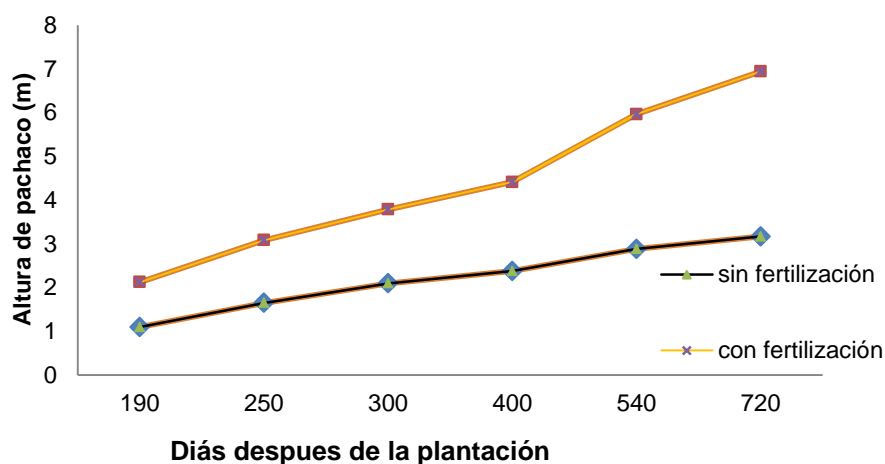


Figura 4.1. Evolución de la altura de planta de pachaco sin y con fertilización (aplicación de N, P, K, Mg, S, Zn + cal) hasta los 720 días después de la plantación.

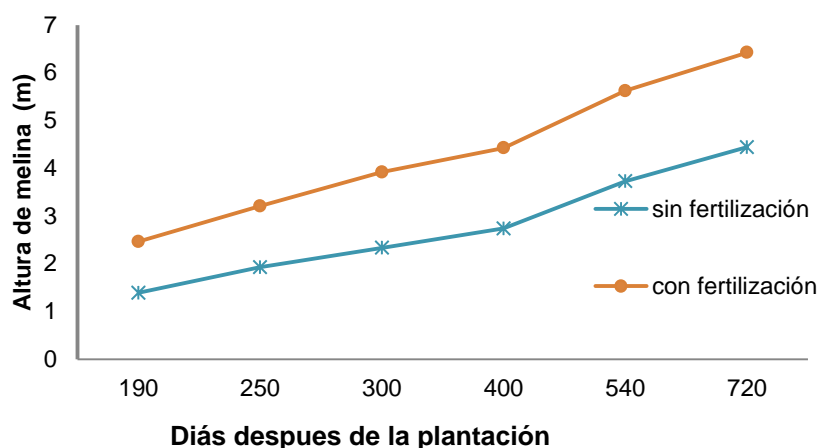


Figura 4.2. Evolución de la altura de planta de melina sin y con fertilización (aplicación de N, P, K, Mg, S, Zn + cal) hasta los 720 días después de la plantación.

La diferencia de la altura de planta por efecto de la fertilización, en las dos especies, se atribuye al efecto combinado de los nutrientes aplicados (N, P, K, Ca, Mg, S, Zn) y del ion carbonato de la cal ($\text{CO}_3^{=}$), que facilita la absorción de los nutrientes, especialmente del fósforo, debido al incremento del pH (Valarezo, 2004b).

El crecimiento en altura de las dos especies con y sin fertilización hasta los 720 días (Figuras 4.1 y 4.2) se ajustó al modelo lineal y fueron significativas (Cuadro 4.1), debido a que se evaluó la etapa juvenil de las mismas, en la cual la acumulación de biomasa tiene la tendencia lineal.

Cuadro 4.1. Análisis de regresión lineal simple para altura de planta (m) a través del tiempo para pachaco y melina con y sin fertilización.

Variable y factores en estudio aplicados a la regresión	Ecuación de regresión	Estadísticos asociados al cálculo de la regresión
Pachaco con fertilización	$Y = 0,82 + 0,01\text{días}$	$R^2 = 0,81$; $P = <0,0001$
Pachaco sin fertilización	$Y = 0,74 + 0,0037\text{días}$	$R^2 = 0,59$; $P = <0,0001$
Melina con fertilización	$Y = 1,42 + 0,01\text{días}$	$R^2 = 0,80$; $P = <0,0001$
Melina sin fertilización	$Y = 0,49 + 0,01\text{días}$	$R^2 = 0,87$; $P = <0,0001$

El crecimiento de G arborea que fue de $0,9 \text{ cm día}^{-1}$ durante los primeros 720 días, es similar a los promedios reportados por Urrego (2004) en Colombia los cuales están en el rango de $0,7 \text{ cm día}^{-1}$ a $1,23 \text{ cm día}^{-1}$ en suelos de textura arcillosa con mal y buen drenaje, respectivamente. Por su parte Otsamo (2002) en Indonesia con una densidad de $1111 \text{ plantas ha}^{-1}$ logró un crecimiento de 1 cm día^{-1} a los dos años de instalado el cultivo.

4.1.2. Diámetro basal.

Para diámetro basal se observaron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,01$) para el factor fertilización en todas las fechas de registro. Además, se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$) para el factor especies arbóreas a los 300 días, 400 días y 540 días después de la plantación, pero no se presentó ninguna interacción entre los dos factores (fertilización y especies arbóreas). El Coeficiente de variación está en el rango de 13,6 % a 15,4 %.

La evolución del diámetro basal por efecto de la fertilización en las seis fechas de registro se ilustra en las Figuras 4.3 (pachaco) y 4.4 (melina).

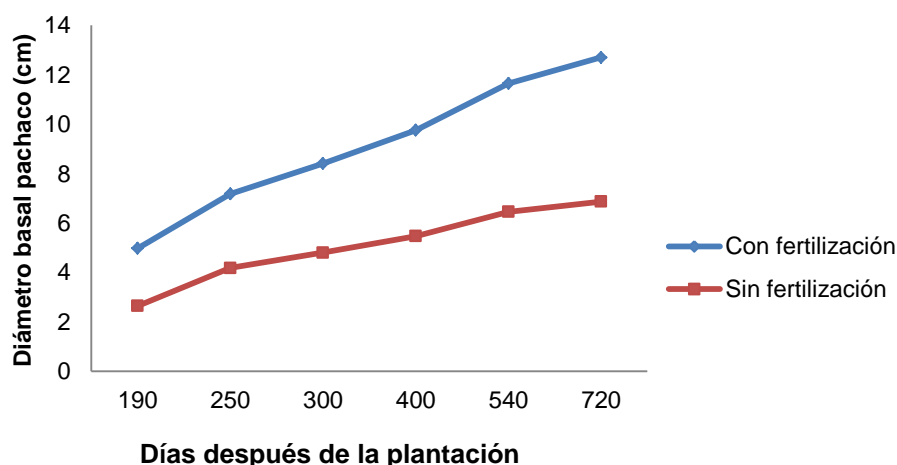


Figura 4.3. Evolución del diámetro basal del pachaco sin y con fertilización hasta los 720 días después de la plantación.

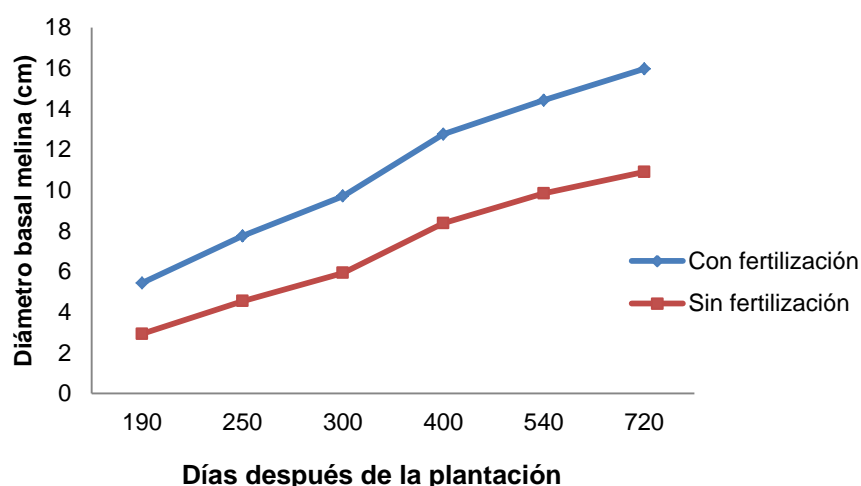


Figura 4.4. Evolución del diámetro basal de la melina sin y con fertilización hasta los 720 días después de la plantación.

4.1.3. Diámetro a la altura del pecho (DAP).

Para DAP de los árboles a los dos años desde la plantación no hubo significancia estadística para los factores especies arbóreas, carbón vegetal ni sus interacciones, pero se detectó diferencias altamente significativas para el factor fertilización, observándose un DAP promedio de 11,1 cm con fertilización y de 6 cm sin fertilización, equivalente a un incremento de 84,3 %. Esto se explica por la acción combinada de los nutrientes y la cal aplicados. El promedio de 11,1 cm coincide con los resultados logrados por Otsamo (2002) en Indonesia con una densidad de 1111 plantas ha^{-1} a los dos años de instalado el cultivo. El CV fue de 16,4 %, lo que indica una aceptable homogeneidad del suelo en el experimento (Anexo 7.7).

Es pertinente mencionar que hasta los 720 días de registro de las tres variables de crecimiento de los árboles (altura, DB y DAP) no se detectaron diferencias estadísticas significativas por efecto de las dosis de 0 t ha^{-1} , 3 t ha^{-1} y 6 t ha^{-1} de carbón vegetal.

4.1.4. Volumen ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)

El análisis estadístico del volumen de los árboles a los dos años desde la plantación mostró diferencias estadísticas altamente significativas únicamente

para el factor fertilización. Observándose un volumen promedio de 79 m³ con fertilización y de 21,5 m³ sin fertilización, equivalente a un incremento de 267 %. Al igual que para la altura, diámetro basal y DAP explicándose este efecto por la acción combinada de los nutrientes y la cal aplicados. El CV fue de 41 % (Anexo 7.7).

Adicionalmente se encontró que *Gmelina* en el suelo del experimento (franco arenoso y CIC de 10 cmol (+) kg⁻¹ suelo), alcanzó una productividad de 31 m³ ha⁻¹ año⁻¹, que resulta cercano a los 37 m³ ha⁻¹ año⁻¹ obtenido por Urrego (2004) en Colombia en suelos de textura franco arcillosos (CIC: 49 cmol (+) kg⁻¹ suelo) y bien drenados, con una precipitación de 1000 mm.

4.2. Características físico-químicas del suelo y evolución de las condiciones químicas y de fertilidad.

4.2.1. Características físicas del suelo.

4.2.1.1 Características morfométricas y físicas del perfil del suelo

El perfil interpretado resultó ser representativo de los cuatro perfiles de suelos descritos en el área experimental, el mismo que hasta 1,2 m de profundidad está conformado por una delgada capa orgánica de 3 cm a 4 cm, un horizonte Ap de 16 cm, gris muy oscuro a negro, franco arenoso, bloques subangulares, medios y finos, moderadamente desarrollados; un horizonte AE de 14 cm, gris muy oscuro, arenoso franco; un horizonte Bt1 de 20 cm, franco arcillo arenoso; bloques subangulares, medios y finos, moderadamente desarrollados; un horizonte Bt2 de 20 cm franco arcillo arenoso, bloques subangulares, medios y finos, moderadamente desarrollados; con recubrimientos de arcilla (cutanes) muy delgados y discontinuos; una transición CB de 22 cm, franco arcillo arenoso; bloques subangulares, medios y finos, moderadamente desarrollados; y, un horizonte C de 28 cm, blanco, arcillo limoso, con granos de cuarzo visibles menores y mayores a 2 mm; masivo. En la capa superior del suelo mineral existen abundantes raíces finas, disminuyendo a muy pocas hasta 80 a 100 cm de profundidad (Figura 4.5).



Figura 4.5. Perfil 1 del área experimental (*Typic Kandihumults*).

4.2.1.2 Velocidad de infiltración

En el cuadro 4.2 se presenta los resultados de la determinación de la infiltración básica en cada uno de los cuatro bloques del sitio experimental La Victoria. Los valores promedio de las dos pruebas corresponden a una velocidad de infiltración que va desde moderadamente lenta ($1,7 \text{ cm h}^{-1}$) para el bloque I, a moderadamente rápida ($6,9 \text{ cm h}^{-1}$) para el bloque III. Este rango evidencia la variabilidad espacial de las condiciones físicas del suelo en el sitio experimental, lo cual se podría relacionar con el tipo de cobertura vegetal del terreno. En el caso del bloque I, cubierto inicialmente de pasto, la infiltración moderadamente lenta devendría de la concomitante presencia de ganado vacuno, el mismo que por el pisoteo habría ocasionado cierta compactación del suelo; en cambio, el bloque III, inicialmente cubierto por vegetación arbustiva, la infiltración moderadamente rápida se atribuiría tanto a la menor compactación como a los canalículos que forman las raíces de estas plantas. En todo caso, el promedio general de $4,8 \text{ cm/h}$, correspondiente a una velocidad de infiltración media, se atribuye a la delgada capa orgánica; así como, a la textura franca, la estructura granular y la presencia de abundantes raíces en el horizonte Ap.

Cuadro 4.2. Infiltración básica en los bloques del sitio experimental.

BLOQUE	PRUEBA 1 (cm/h)	PRUEBA 2 (cm/h)	PROMEDIO (cm/h)	EQUIVALENCIA
I	1,4	1,9	1,7	Mod. Lenta
II	9,5	2,7	6,1	Media
III	10,3	3,4	6,9	Mod. Rápida
IV	3,9	5,5	4,7	Media
PROMEDIO	6,3	3,4	4,8	Media

4.2.1.3 Evolución de las características físicas del suelo

Durante la fase de campo, después de la plantación de las especies arbóreas, no se tomaron muestras inalteradas ni se realizaron pruebas de infiltración, por cuanto las raíces de los árboles en estos suelos crecen formando una densa red superficial en busca de nutrientes, más no en profundidad. La introducción de los cilindros tanto para tomar las muestras inalteradas como para las pruebas de infiltración hubieran afectado las raíces, por lo que se desistió de realizar evaluaciones parciales de la incidencia de la aplicación de carbón vegetal y fertilización sobre las características físicas. Estas se evaluarán al final del proyecto, después del corte de los árboles, que se tiene previsto para agosto de 2014. Se debe aclarar que las características físicas sobre las cuales incidiría la aplicación de carbón vegetal y fertilización serían la densidad aparente (porosidad total, capacidad de aireación y agua aprovechable) y la velocidad de infiltración con la concomitante mayor regulación hídrica por parte del suelo.

4.2.2. Características químicas del suelo

La reacción del suelo fue muy fuertemente ácida, con valores de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ de 4,9 para el horizonte Ap, disminuyendo gradualmente hasta 4,7 en los horizontes inferiores. En todos los horizontes minerales el pH_{KCl} fue menor al $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ en un rango de 0,7 a 0,8 unidades. La acidez intercambiable ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) disminuyó con la profundidad, correspondiendo el valor más alto ($3,48 \text{ cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) al horizonte Ap, y el menor ($1,74 \text{ cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) al horizonte C. El contenido de materia orgánica (MO), osciló entre 0,17 % y 3,8 % para los horizontes C y Ap, respectivamente.

En función de las características indicadas, el suelo ha sido clasificado como Typic Kandihumults (USDA, 2010).

4.2.2. Contenidos totales de los elementos.

4.2.3.1. Contenidos totales en el perfil del suelo y en la capa 00 - 25 cm antes de la instalación del experimento.

En el cuadro 4.3 se reporta los valores de los contenidos de Ca, Mg, K, Mn, Al, Fe, Zn, Cu y Si en el Perfil antes de la instalación de la fertilización y plantación.

Cuadro 4.3. Contenidos totales de Ca, Mg, K, Mn, Al, Fe, Zn Cu, Si en el Perfil del experimento.

Horizonte	Ca	Mg	Na	K	Al	Fe	Si	Zn	Mn	Mo
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹			
Ap	0,15	0,22	0,07	0,27	30,33	9,65	343,20	3	33	
AE	0,13	0,25	0,06	0,38	50,10	14,93	248,40	13	44	
Bt1	0,14	0,31	0,05	0,43	53,50	14,66	257,20	5	40	
Bt2	0,09	0,25	0,06	0,58	78,97	18,19	209,80	9	48	
CB	0,07	0,25	0,06	0,79	85,03	15,30	190,60	9	43	6
C	0,55	0,52	0,13	0,43	47,22	12,27	224,60	9	69	

Los contenidos totales de Ca oscilaron entre 0,07 g kg⁻¹ y 0,55 g kg⁻¹, la distribución de este elemento en el perfil presentó valores menores desde el horizonte Ap hasta el CB. Los valores mayores del contenido de este elemento en el perfil indican una acumulación del elemento en la parte superior por efecto de la vegetación (reciclaje del nutriente).

En el perfil, los contenidos totales de Mg se encontraron entre 0, 22 g kg⁻¹ y 0,52 g kg⁻¹. La distribución de este elemento en el interior del suelo fue irregular, con valores mayores en los horizontes Bt₁ y C y menores en los demás horizontes. Los valores mayores en el horizonte Bt₁ se podría asociar con el contenido de arcilla.

La distribución en el perfil del suelo de los contenidos totales de Na, es irregular, con valores menores en el horizonte Ap hasta el CB y mayores en el horizonte C, estos oscilaron entre 0,05 g kg⁻¹ y 0,13 g kg⁻¹,

Los contenidos totales de K en el interior del suelo oscilaron entre $0,27 \text{ g kg}^{-1}$ y $0,79 \text{ g kg}^{-1}$, la distribución de este elemento en el perfil presentó valores mayores desde el horizonte Ap hasta el CB y menores en el horizonte C. Los contenidos mayores de este elemento en el perfil puede asociarse con el contenido de arcilla; en cambio los valores menores en el horizonte C reflejaría una pobreza del mismo en el material parental.

En el interior del suelo, los contenidos totales de Al variaron entre $30,33 \text{ g kg}^{-1}$ y $85,03 \text{ mg kg}^{-1}$, la distribución de este elemento en el perfil presentó valores de menor a mayor desde el horizonte Ap hasta el CB, y contenidos menores en el horizonte C. Los contenidos de menor a mayor de este elemento en el perfil están relacionados con la cantidad de arcilla.

La concentración de los contenidos totales de Fe en el interior del suelo fluctuó entre $9,65 \text{ g kg}^{-1}$ y $18,19 \text{ g kg}^{-1}$, presentando valores de menor a mayor desde el horizonte Ap hasta el Bt2, y valores menores en los horizontes CB y C. El mayor contenido de este elemento en la parte superior del perfil sugiere tanto una acumulación por acción de reciclaje de la vegetación, como una acumulación residual por el proceso de ferralitización.

En el interior del suelo los contenidos totales de Si oscilaron entre $190,6 \text{ g kg}^{-1}$ y $343,2 \text{ g kg}^{-1}$. La concentración de este elemento en el perfil presentó valores de mayor a menor desde el horizonte Ap hasta el CB y valores mayores en el horizonte C. Los contenidos de mayor a menor de este elemento en el perfil hasta el horizonte CB indica un proceso de desilificación y la formación de arcillas tipo 1/1; en cambio, los valores mayores en el horizonte C, se atribuye al mayor contenido de este elemento en el material parental.

La concentración de este elemento en el perfil varía irregularmente con la profundidad en un rango entre 3 mg kg^{-1} y 13 mg kg^{-1} . La distribución irregular del contenido de este elemento en el perfil sugiere una cierta acumulación del elemento en la parte superior por efecto de reciclaje por parte de la vegetación.

Los contenidos totales de Mn oscilaron entre 33 mg kg⁻¹ y 69 mg kg⁻¹, la distribución de este elemento en el perfil presenta una variación irregular, con valores menores desde el horizonte Ap hasta el Bt₂ y un valor mayor en el horizonte C.

En el interior del suelo, únicamente en el horizonte CB se pudo detectar la presencia de Mo, alcanzando una concentración de 6 mg kg⁻¹. Para los horizontes restantes, los contenidos de este elemento se encontraron por debajo del límite inferior de detección de la técnica de análisis empleada.

Los contenidos totales de Ca, Mg, Na, Mn son mayores en el Horizonte C, atribuyéndose al aporte del material parental aún poco meteorizado.

Cuadro 4.4. Contenidos totales de Ca, Mg, K, Mn, Al, Fe, Zn Cu y Si en la capa 00 - 25 cm antes de la fertilización (marzo 2009) y sitios referenciales.

Tratamiento	Ca	Mg	Na	K	Al	Fe	Si	Zn	Mn	Mo
T1	0,46	0,29	0,13	0,34	32,04	12,86	301,50	8,4	56	6
T2	0,54	0,44	0,22	0,39	38,17	12,52	340,10	5,7	53	7
T3	0,45	0,27	0,20	0,33	26,33	11,52	342,80	3,5	55	9
T4	0,40	0,26	0,19	0,30	22,47	11,13	343,30	4,7	55	9
T5	0,37	0,33	0,19	0,38	34,58	14,71	309,20	10,5	68	11
T6	0,31	0,31	0,14	0,34	32,43	13,50	327,20	6,8	54	14
T7	0,33	0,34	0,15	0,40	43,55	13,61	326,30	7,4	53	15
T8	0,25	0,27	0,12	0,39	48,01	13,28	348,00	7,7	45	15
T9	0,23	0,25	0,12	0,43	59,06	15,33	321,90	11,8	49	15
T10	0,30	0,34	0,12	0,38	48,07	15,86	314,50	11,3	57	17
T11	0,19	0,25	0,09	0,28	33,12	12,48	347,90	6,1	44	
T12	0,25	0,28	0,12	0,30	36,77	13,82	333,40	8,0	65	
Promedio	0,34	0,30	0,15	0,36	37,88	13,39	329,68	7,7	54	12
C V %	31	18	27	13	27,00	11	5	34	13	31

En el experimento de Zamora, en la capa 00 - 25 cm, antes de la instalación de la fertilización y plantación, el promedio de los contenidos totales de Ca (0,34 g kg⁻¹), Mg (0,30 g kg⁻¹), Na (0,15 g kg⁻¹), K (0,36 g kg⁻¹) (Cuadro 4.4) fueron mayores a 0,03 g kg⁻¹, 0,03 g kg⁻¹, 0,08 g kg⁻¹, y 0,13 g kg⁻¹, respectivamente; mientras que los contenidos totales de Al (37,9 g kg⁻¹), Fe (13,4 g kg⁻¹) y Zn (7,65 mg kg⁻¹) fueron menores a 149,2 g kg⁻¹, 54,2 17 g kg⁻¹, 17 mg kg⁻¹, en su orden, al

promedio para tres Ferrasoles extremadamente meteorizados del Cerrado – Brasil (Wedephol, 1995).

El promedio de los contenidos totales de Ca, Mg, Na y K fueron menores a $0,51 \text{ g kg}^{-1}$, $0,76 \text{ g kg}^{-1}$, $1,32 \text{ g kg}^{-1}$, y $16,4 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente; mientras que los contenidos totales de Al, Fe y Zn también fueron menores a $47,4 \text{ g kg}^{-1}$, $20,6 \text{ g kg}^{-1}$, 117 mg kg^{-1} , en su orden, al promedio para 29 suelos Cambisoles del bosque húmedo montano de la Estación Científica San Francisco (ECSF) de la vertiente oriental de la Cordillera Real de Los Andes, que conforma la vertiente superior de la cuenca Amazónica, desarrollados sobre filitas, cuarcitas y meta-areniscas del paleozoico, (a 35 km de distancia del sitio experimental y a un rango de altitud de 1850 msnm a 2200 msnm).

4.2.2.2. Evolución de los contenidos totales de los elementos.

En el anexo 7.8 se presentan los valores de los contenidos totales de Ca, Mg, K, Fe, Zn, Mo, Si y Al, para los diferentes tratamientos en las parcelas bloque I del experimento (no se realizó el ADEVA, por cuanto se recolectaron solo 12 muestras de suelos), en las capas de 00 – 25 cm y 25 - 50 cm, de las muestras tomadas a los seis y 18 meses después de la fertilización y plantación; mientras que en los anexos 7.9 y 7.10 se muestran los promedios y balances entre los tratamientos con fertilización, sin fertilización, sin fertilización más carbón vegetal y fertilización + carbón vegetal y testigos.

Calcio.

El contenido total de Ca en la capa 00 - 25 cm a los 18 meses, osciló entre $0,11 \text{ mg kg}^{-1}$ y $1,1 \text{ g kg}^{-1}$. En los tratamientos con fertilización: T2 (pachaco + 0 t ha^{-1} de carbón vegetal), T4 (pachaco + 3 t ha^{-1} de carbón vegetal), T6 (pachaco + 6 t ha^{-1} de carbón vegetal), T8 (melina + 0 t ha^{-1} de carbón vegetal), T10 (melina + 3 t ha^{-1} de carbón vegetal) y T12 (melina + 6 t ha^{-1} de carbón vegetal), los contenidos se incrementaron en $0,49 \text{ g kg}^{-1}$ en relación al inicio del ensayo (Figura 4.6), encontrándose en el rango de $0,60$ y $1,1 \text{ g kg}^{-1}$; en cambio, en los tratamientos sin fertilización: T1 (pachaco + 0 t ha^{-1} de carbón vegetal: testigo), T3 (pachaco + 3 t ha^{-1}

ha⁻¹ de carbón vegetal), T5 (pachaco + 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal), T7 (melina + 0 t ha⁻¹ de carbón vegetal: testigo), T9 (melina + 3 t ha⁻¹ de carbón vegetal) y T11 (melina + 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal), los valores, disminuyeron en promedio 0,14 g kg⁻¹ fluctuando entre 0,11 g kg⁻¹ y 0,30 g kg⁻¹. En los tratamientos que se aplicaron 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal y que no recibieron fertilización, el contenido total de Ca disminuyó en promedio 0,11 g kg⁻¹, con respecto al inicio. El aumento de la concentración de Ca en los tratamientos con fertilización se explica por la adición de 5 t ha⁻¹ de CaCO₃.

En la capa 25-50 cm, las concentraciones del Ca fluctuaron entre 0,056 g kg⁻¹ y 0,37 g kg⁻¹. Se incrementó 0,11 g kg⁻¹ del Ca en esta capa a los 18 meses, en los tratamientos con fertilización y carbón vegetal con respecto al testigo (sin fertilización + 0 t ha⁻¹ de carbón vegetal), lo que indica que existió movilización de este elemento (Anexo 4.4.2).

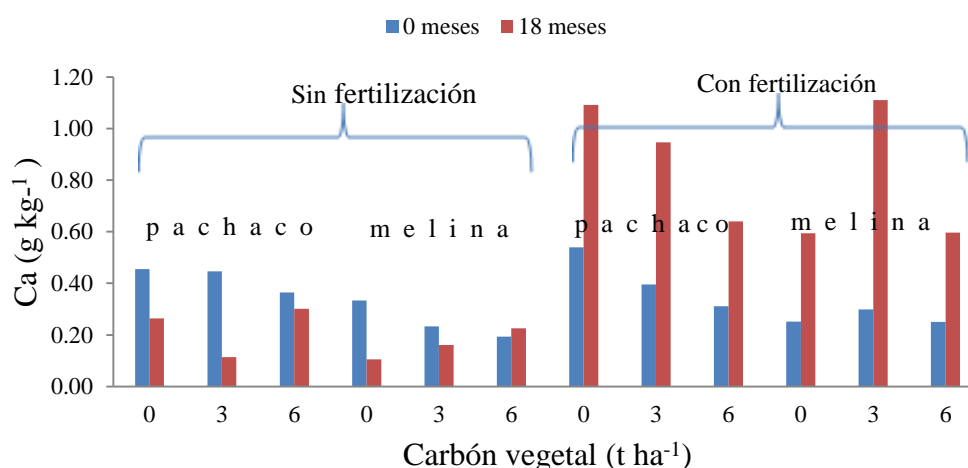


Figura 4.6. Evolución del contenido total de Ca, en la capa 00 – 25 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación.

Magnesio.

Los contenidos totales de Mg en la capa de 00 - 25 cm a los 18 meses oscilaron entre 0,25 g kg⁻¹ y 0,58 g kg⁻¹. En los tratamientos fertilizados (que incluyó la aplicación de este elemento) los contenidos se incrementaron en promedio 0,14 g kg⁻¹ en relación al inicio (Figura 4.7), encontrándose en el rango de 0,30 g kg⁻¹ y 0,58 g kg⁻¹; en cambio, en los tratamientos sin fertilización, los valores aumentaron en 0,09 g kg⁻¹, fluctuando entre 0,25 g kg⁻¹ y 0,55 g kg⁻¹. En los

tratamientos que se aplicaron carbón vegetal y sin fertilización, el contenido total de Mg disminuyó con respecto el inicio en $0,09 \text{ g kg}^{-1}$. El aumento de los contenidos totales de Mg en los tratamientos con fertilización se atribuye a la aplicación de este elemento (118 kg ha^{-1}).

En la capa de 25 - 50 cm y a los 18 meses las concentraciones del elemento variaron entre $0,17$ y $0,51 \text{ g kg}^{-1}$. El incremento de $0,11 \text{ g kg}^{-1}$ de los contenidos totales de Mg en los tratamientos con fertilización y carbón vegetal, con respecto al testigo, implica que existió movilización de este elemento desde la capa superior.

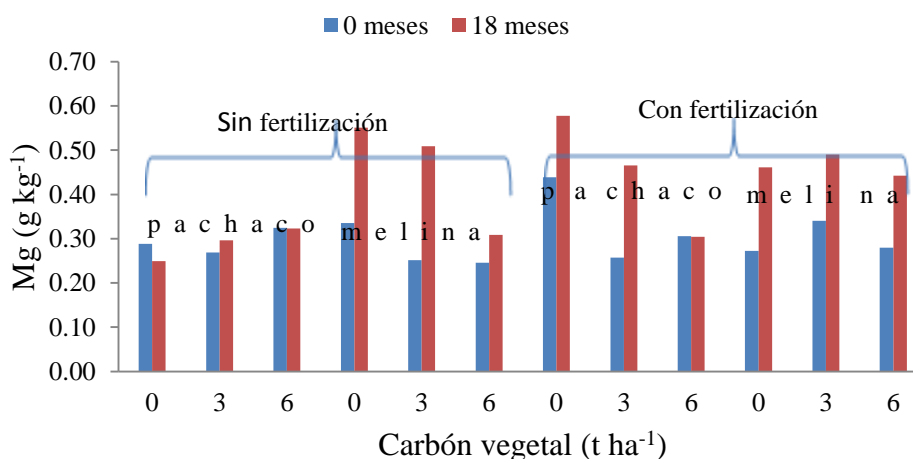


Figura 4.7. Evolución del contenido total de Mg, en la capa 00 - 25, al inicio y 18 meses después de la plantación.

Potasio.

El contenido total de K en la capa 00 - 25 cm a los 18 meses varió entre $0,30 \text{ g kg}^{-1}$ y $1,71 \text{ g kg}^{-1}$. En los tratamientos con fertilización, los contenidos se incrementaron en $0,94 \text{ g kg}^{-1}$ en relación al inicio (Figura 4.8), encontrándose en el rango de $1,06 \text{ g kg}^{-1}$ y $1,52 \text{ g kg}^{-1}$; en cambio, en los tratamientos sin fertilización, los valores se incrementaron en $0,56 \text{ g kg}^{-1}$ y fluctuaron entre $0,30 \text{ g kg}^{-1}$ a $1,71 \text{ g kg}^{-1}$. El incremento del contenido total de K, en los tratamientos con fertilización, se atribuye a la aplicación de 200 kg ha^{-1} de este elemento. En los tratamientos que se aplicaron carbón vegetal y sin fertilización, se observó un incremento $0,52 \text{ g kg}^{-1}$ del contenido de K, esto se debe al aporte de este elemento por parte del carbón vegetal.

En la capa 25 – 50 cm las concentraciones del elemento oscilaron entre $0,39 \text{ g kg}^{-1}$ y $1,69 \text{ g kg}^{-1}$. El incremento promedio de $0,73 \text{ g kg}^{-1}$ de los contenidos de K en los tratamientos con fertilización y carbón vegetal se podría atribuir a una importante migración de este elemento desde la capa 00 - 25 cm, lo cual significa que el K no fue completamente retenido por el carbón vegetal.

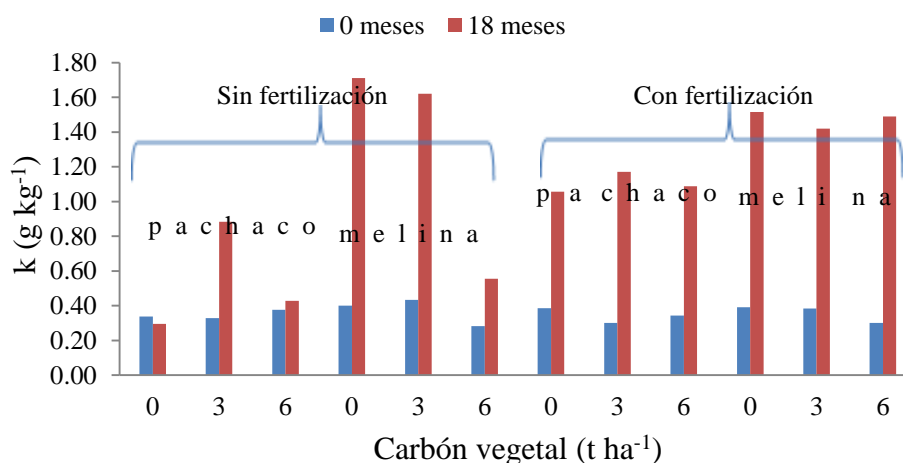


Figura 4.8. Evolución del contenido total de K, en la capa 00 – 25 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación.

Sodio.

El contenido total de Na en la capa 00 - 25 cm a los 18 meses variaron entre 54 mg kg^{-1} y 311 mg kg^{-1} . En los tratamientos con fertilización (no incluyó la aplicación de este elemento), los contenidos disminuyeron en 45 mg kg^{-1} en relación al inicio (Figura 4.9), encontrándose en el rango de 18 mg kg^{-1} y 191 mg kg^{-1} ; en cambio, en los tratamientos sin fertilización, tiene un incremento promedio de 7 mg kg^{-1} , oscilando entre 79 mg kg^{-1} y 311 mg kg^{-1} . En los tratamientos que se aplicaron 3 t ha^{-1} y 6 t ha^{-1} de carbón vegetal y sin fertilización, en relación al inicio, se observó un incremento promedio de 30 mg kg^{-1} de Na;

En la capa 25 - 50 cm las concentraciones del elemento oscilaron entre 72 mg kg^{-1} y 147 mg kg^{-1} . Disminuyó el Na en 7 mg kg^{-1} de los contenidos totales de Na en relación a los testigos. Estas variaciones se deben a la naturaleza del material parental.

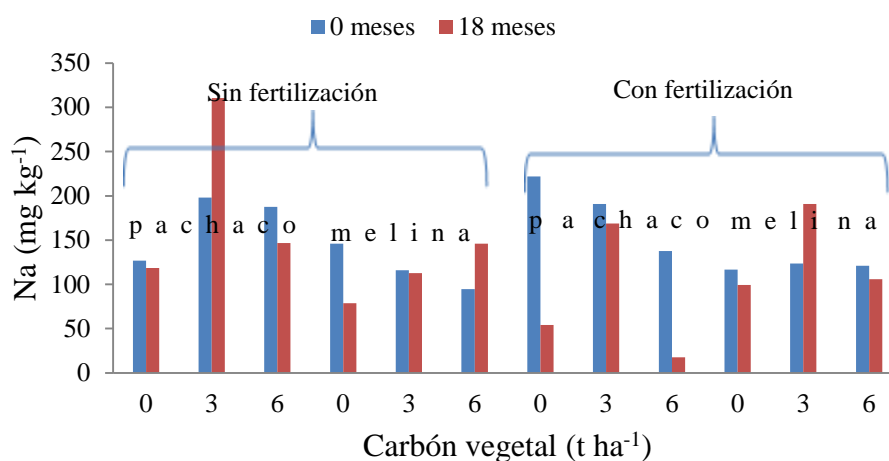


Figura 4.9. Evolución del contenido total de Na, en la capa de 00 - 25 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación.

Hierro.

El contenido total de Fe en la capa 00 - 25 cm a los 18 meses varió entre 7,25 g kg⁻¹ y 17,82 g kg⁻¹. En los tratamientos con fertilización (que no incluyó la aplicación de este elemento), los contenidos disminuyeron en promedio 3,29 g kg⁻¹ en relación al inicio (Figura 4.10), encontrándose en el rango de 7,58 g kg⁻¹ y 17,82 g kg⁻¹; mientras que en los tratamientos sin fertilización disminuyó el contenido total de Fe en promedio 2,94 g kg⁻¹. En los tratamientos que se aplicaron 3 y 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal y sin fertilización, existió un decrecimiento de 3,60 g kg⁻¹ del contenido total de hierro,

En la capa 25 - 50 cm las concentraciones del Fe oscilaron entre 5,27 g kg⁻¹ y 11,52 g kg⁻¹; a los tratamientos que se aplicaron carbón vegetal y fertilización, existió un decrecimiento promedio de 1,15 g kg⁻¹ en relación al testigo.

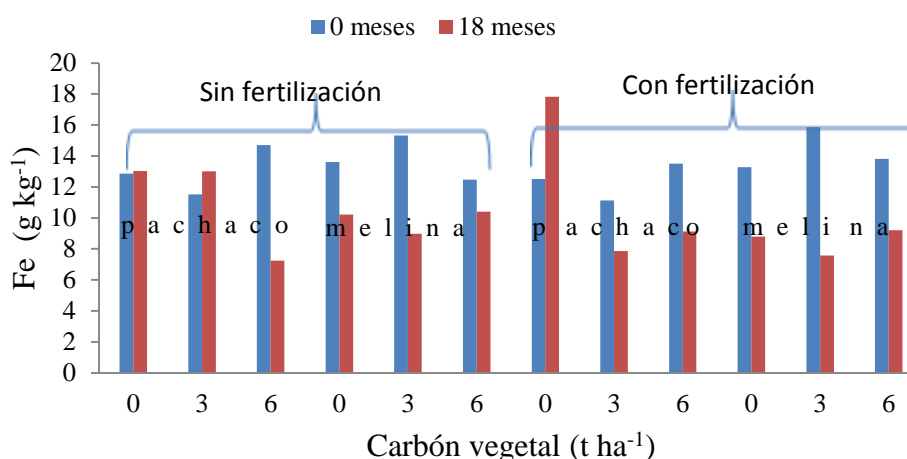


Figura 4.10. Evolución del contenido total de Fe, en la capa 00 - 25 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación.

Zinc.

El contenido total de Zn, en la capa 00 - 25 cm a los 18 meses varió entre 11 y 72 mg kg⁻¹. En los tratamientos con fertilización, los contenidos se incrementaron en promedio de 30 mg kg⁻¹ en relación al inicio (Figura 4.11), encontrándose en el rango de 23 mg kg⁻¹ y 72 mg kg⁻¹; en cambio, en los tratamientos sin fertilización hubo un incremento promedio de 6 mg kg⁻¹, los valores oscilaron entre 11 mg kg⁻¹ y 17 mg kg⁻¹. En los tratamientos que se aplicaron 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal y sin fertilización, se incrementó en promedio 5 mg kg⁻¹. El incremento significativo de los contenidos totales de Zn, en los tratamientos con fertilización, se atribuye a la aplicación de 40 kg ha⁻¹ de este elemento.

En la capa 25 - 50 cm las concentraciones del elemento fluctuaron entre 6 mg kg⁻¹ y 31 mg kg⁻¹. En los tratamientos con carbón vegetal + fertilización se observó un decrecimiento promedio de 5 mg kg⁻¹ del contenido total de Zn en relación con los testigos. La disminución de los contenidos de este elemento, indica que no existió movilización desde la capa superior.

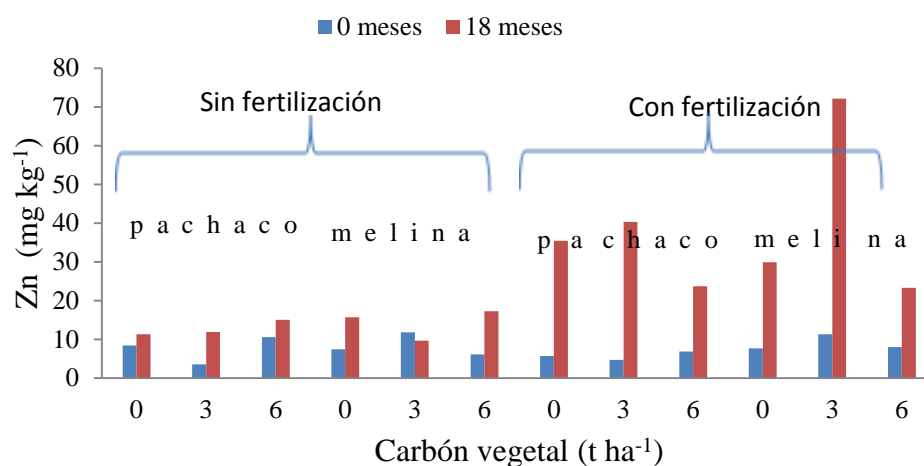


Figura 4.11. Evolución del contenido total de Zn, en la capa 00 - 25 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación.

Manganeso.

El contenido total de Mn en la capa 00 - 25 cm varió entre 19 mg kg⁻¹ y 60 mg kg⁻¹. En todos los tratamientos hay una tendencia a disminuir en relación al inicio (Figura 4.12), encontrándose a los 18 meses para los tratamientos con fertilización (que no incluyó la aplicación de este elemento) en el rango de 28 mg kg⁻¹ a 60 mg kg⁻¹; y, en los tratamientos sin fertilización, en el rango de 19 mg kg⁻¹ a 56 mg kg⁻¹.

En la capa 25 - 50 cm las concentraciones del Mn oscilaron entre 24 mg kg⁻¹ a 41 mg kg⁻¹. En los tratamientos que se aplicó carbón vegetal + fertilización también disminuyó el contenido total de Mn en 3 mg kg⁻¹.

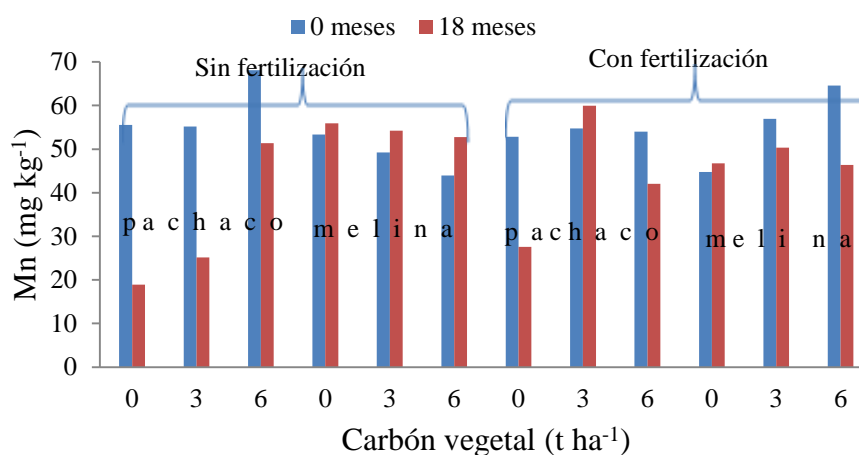


Figura 4.12. Evolución del contenido total de Mn, en la capa 00 - 25 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación.

Molibdeno.

El contenido total de Mo únicamente se reporta al inicio para los tratamientos testigos al T10 (melina + con fertilización + 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal), fluctuando en el rango de 6 a 17 mg kg⁻¹, por cuanto a los 18 meses, en las dos capas los valores se encuentran por debajo del límite inferior de detección de la técnica de análisis empleada.

Aluminio.

El contenido total de Al a los 18 meses en la capa 00 - 25 cm varió entre 19,5 y 81,7 g kg⁻¹. En la capa 25 - 50 cm las concentraciones del elemento oscilaron entre 24,83 y 86,3 g kg⁻¹.

En los tratamientos con fertilización, los contenidos se incrementaron en 10,99 g kg⁻¹ en relación al inicio (Figura 4.13), encontrándose en el rango de 19,5 g kg⁻¹ y 64,19 g kg⁻¹; en cambio, en todos los tratamientos sin fertilización, también se incrementaron en 17,89 g kg⁻¹, oscilando entre 22,96 g kg⁻¹ y 81,71 g kg⁻¹. En los tratamientos que se aplicaron 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal y fertilización, se observó un decrecimiento de 7,8 g kg⁻¹.

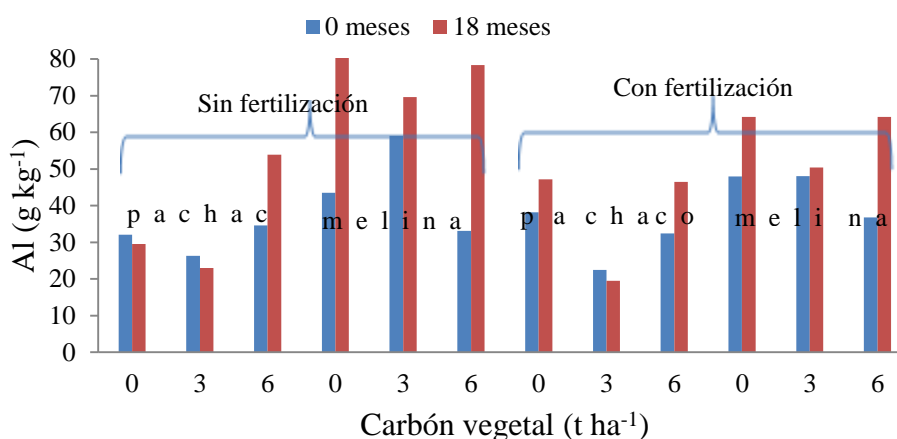


Figura 4.13. Evolución del contenido total de Al, en la capa 00 – 25 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación.

Silicio.

El contenido total de Si a los 18 meses en la capa 00 - 25 cm varió entre 333,9 g kg⁻¹ y 427,5 g kg⁻¹. En la capa 25 - 50 cm las concentraciones del elemento oscilaron entre 263,7 g kg⁻¹ y 420 g kg⁻¹.

En todos los tratamientos los contenidos se incrementaron en relación al inicio (Figura 4.14), encontrándose a los 18 meses, para los tratamientos con fertilización hubo un incremento promedio de 72,7 g kg⁻¹ (que no incluyó la aplicación de este elemento) y fluctuaron en el rango de 354,5 g kg⁻¹ a 427,5 g kg⁻¹; y, en los tratamientos sin fertilización, con un incremento promedio de 56,2 g kg⁻¹ y en el rango de 333,9 a 412,7 g kg⁻¹.

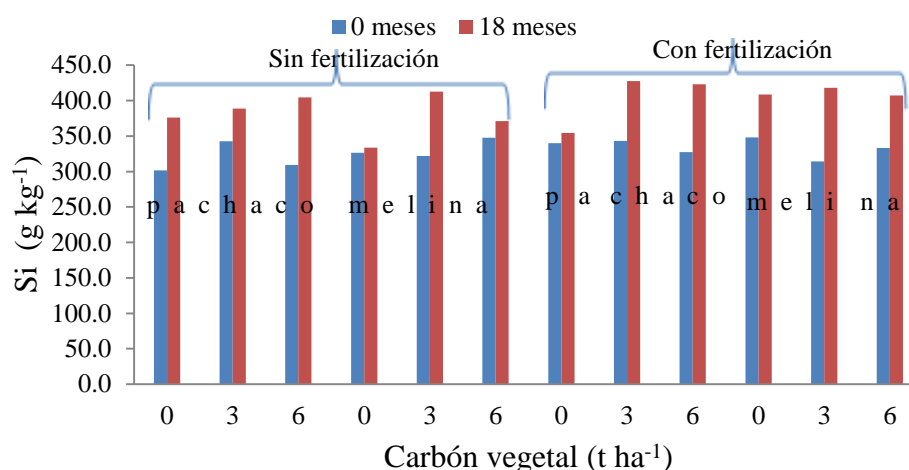


Figura 4.14. Evolución del contenido total de Si, en la capa 00 a 25 cm, al inicio y 18 meses después de la plantación.

Los altos contenidos de Al y Si en todos los tratamientos se deben al mayor contenido de estos elementos en el material parental.

4.2.3. Evolución de las condiciones químicas del suelo hasta 50 cm de profundidad.

No se observó diferencias significativas para los factores especies arbóreas, carbón vegetal ni sus interacciones, en la evolución de las condiciones químicas del suelo.

4.2.3.1. Reacción del suelo.

Se observaron diferencias estadísticas altamente significativas para el factor fertilización, a los seis y 18 meses después de la plantación en la capa 00 - 25 cm y a los 18 meses en la capa 25 - 50 cm; y, diferencias significativas a los seis meses para la capa 25 - 50 cm. Los valores registrados al inicio de la plantación no manifestaron significancia estadística. El coeficiente de variación (CV) osciló entre 3,1 % y 3,8 %, lo cual indica homogeneidad del suelo para esta variable (Anexo 7.11).

En las dos capas y en las dos fechas de evaluación en los tratamientos con fertilización se incrementó significativamente el $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ en comparación con los tratamientos sin fertilización (Cuadro 4.5). Al inicio del experimento los valores de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ fueron iguales manteniéndose en el rango de muy fuertemente ácido, por lo tanto se puede indicar que el incremento se debe a la aplicación de cal (5 t ha^{-1} de cal) conjuntamente con la fertilización.

Cuadro 4.5. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25 cm	0	4,55 a	4,58 a
	6	4,41 b	5,01 a
	18	4,84 b	5,20 a
25 - 50 cm	6	4,42 b	4,55 a
	18	4,67 b	4,83 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Acidez intercambiable.

Para el factor fertilización en las dos capas (00 – 25 cm y 25 - 50 cm) se registraron diferencias estadísticas altamente significativas para acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) a los seis y 18 meses después de la plantación y no se observaron diferencias al inicio de la plantación. También, para la interacción especie arbórea*carbón se encontraron diferencias significativas a los seis meses para la capa de 25 - 50 cm (Anexo 7.12).

En las dos capas y en las fechas de evaluación en los tratamientos con fertilización (que recibieron 5 t ha^{-1} de cal) disminuyó significativamente la acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) en comparación con los tratamientos sin fertilización (Cuadro 4.6). Al inicio del experimento la acidez intercambiable fueron iguales manteniéndose en el rango de 3,2 - 3,4 cmol (+) kg^{-1} , por lo tanto se puede indicar, que la acidez intercambiable disminuyó en los tratamientos con fertilización, por el efecto neutralizante de la cal.

Cuadro 4.6. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para acidez intercambiable ($Al^{3++} H^+$) $cmol (+) kg^{-1}$, en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25 cm	0	3,4 a	3,2 a
	6	2,9 b	0,9 a
	18	3,4 b	1,2 a
25 - 50 cm	6	2,9 b	1,8 a
	18	3,6 b	3,0 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

4.2.3.2. Capacidad de intercambio catiónico, bases cambiables y saturación de bases.

Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe).

Para el factor fertilización se observaron diferencias estadísticas altamente significativas para la CICe a los 18 meses, en las dos capas. Los valores del CV oscilaron entre 10 % y 28 %, siendo mayores a 20 % aquellos correspondientes a la capa 00 – 25 cm a los seis y 18 meses, lo que indica heterogeneidad para esta variable (Anexo 7.13).

La CICe, en los tratamientos con fertilización, aumentó significativamente en comparación con los tratamientos sin fertilización en las dos capas y a los 18 meses de evaluación (Cuadro 4.7). Al inicio del experimento la CICe se encontró en el rango de $4,8 cmol (+) kg^{-1}$ a $4,97 cmol (+) kg^{-1}$, equivalente a bajo. El incremento en los tratamientos con fertilización, sugieren que, por un lado, predominan en el suelo arcillas de baja actividad (principalmente caolinita); y, por otro, que el aumento del pH por efecto del encalado ha incrementado las cargas eléctricas negativas dependientes del pH.

Cuadro 4.7. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para CICe $cmol (+) kg^{-1}$, en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25 cm	0	4,97 a	4,80 a
	6	5,63 a	5,66 a
	18	6,10 b	9,44 a
25 - 50 cm	6	4,50 a	4,60 a
	18	5,60 b	6,90 a

Calcio intercambiable (Ca^{++}).

Para el factor fertilización, en las dos capas se observó diferencias estadísticas altamente significativas para Ca^{++} a los 18 meses y, significativas a los seis meses para la capa de 25 - 50 cm. Los valores del CV fueron altos (45 %– 54 %); excepto al inicio en la capa de 00 - 25 cm, cuyo valor fue de 22 %, lo que indica heterogeneidad del experimento para esta variable (Anexo 7.14).

En los tratamientos con fertilización, se incrementó significativamente el Ca^{++} respecto a los tratamientos sin fertilización, en las dos capas y a los 18 meses de evaluación (Cuadro 4.8). Al inicio el Ca^{++} se encontró en el rango de muy bajo 0,76 cmol (+) kg^{-1} a 0,85 cmol (+) kg^{-1} . En la capa 00 - 25 cm en los tratamientos con fertilización se incrementó el Ca^{++} a rango medio, por la aplicación de cal (5 t ha^{-1} CaCO_3). En cambio, en la capa de 25 – 50 cm aunque se evidenció un incremento del contenido del Ca, que se atribuye a cierta lixiviación del elemento desde la capa superior por efecto del encalado, este permaneció en el rango bajo.

Cuadro 4.8. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para Ca cmol (+) kg^{-1} , en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	0,85 a	0,76 a
	6	1,73 a	3,19 a
	18	1,74 b	6,62 a
25 - 50	6	0,91 b	1,73 a
	18	1,26 b	2,91 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Magnesio intercambiable (Mg^{++}).

En el factor fertilización se observaron diferencias estadísticas altamente significativas para el Mg^{++} a los seis y 18 meses, en las dos capas. Los valores del CV fueron altos (24 % – 38 %), lo que indica heterogeneidad del experimento para esta variable (Anexo 7.15).

En los tratamientos con fertilización, se incrementó significativamente el Mg^{++} en relación con los tratamientos sin fertilización para las dos capas y a las dos fechas de evaluación (Cuadro 4.9). Al inicio el Mg^{++} se encontró en el rango de muy bajo

0,28 cmol (+) kg⁻¹ a 0,32 cmol (+) kg⁻¹. En la capa 00 – 25 cm se incrementó el contenido de Mg⁺⁺ en los tratamientos con fertilización a rango bajo, esto se debió a la aplicación de 118 kg ha⁻¹ de Mg. En la capa 25 - 50 cm el incremento del Mg⁺⁺ en menor grado, superando el límite inferior de bajo, indica que el Mg⁺⁺ aplicado en la capa superior se ha movilizó.

Cuadro 4.9. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para Mg⁺⁺ (cmol (+) kg⁻¹), en profundidades de 00-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	0,28	0,32
	6	0,50 b	0,98 a
	18	0,57 b	1,12 a
25 - 50	6	0,32 b	0,56 a
	18	0,37 b	0,61 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Potasio intercambiable (K⁺).

Para el factor fertilización en las dos capas (00 - 25 cm y 25 - 50 cm) se evidenció diferencias estadísticas altamente significativas para el K⁺ a los seis meses. Los valores de los CV fueron altos (21 % – 58 %) (Anexo 7.16).

El contenido de K⁺ en las dos capas y a los seis meses de evaluación, en los tratamientos con fertilización se incrementó significativamente frente a los tratamientos sin fertilización (Cuadro 4.10). El K⁺ al inicio permaneció en el rango bajo (0,18 cmol (+) kg⁻¹ 0,19 cmol (+) kg⁻¹). En la capa 00 – 25 cm se incrementó, aunque permaneció en el mismo rango bajo, se debió a la aplicación de K⁺ (200 kg ha⁻¹). En la capa 25 - 50 cm se incrementó los valores de K⁺, aunque en menor grado que en la capa superior, lo que indica que una fracción del K⁺ aplicado en la capa superior se ha movilizó a la capa 25 - 50 cm.

Cuadro 4.10. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para K cmol (+) kg⁻¹, en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	0,18 a	0,19 a
	6	0,20 b	0,30 a
	18	0,22 a	0,20 a
25 - 50	6	0,11 b	0,22 a
	18	0,10 a	0,14 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Sodio intercambiable (Na⁺).

Los valores del sodio cambiante (Na⁺) en las dos capas (00 - 25 cm y 25 - 50 cm), no presentaron significancia estadística. El CV osciló entre 24 % y 37 %, heterogeneidad del experimento para esta variable (Anexo 7.17).

Los valores de Na⁺ en los tratamientos sin y con fertilización, al inicio y los 18 de meses después de la plantación, en la capas 00 – 25 cm y 25 - 50 cm, se ubicaron en el rango bajo 0,27 cmol (+) kg⁻¹ a 029 cmol (+) kg⁻¹, debido a que no se aplicó este elemento.

Saturación de bases (%).

Para el factor fertilización en las dos capas (00 - 25 cm y 25 - 50 cm) se observó diferencias estadísticas altamente significativas en la saturación de bases (%) a los seis y 18 meses. Los valores del CV oscilaron entre 10 % a 23 % (Anexo 7.18).

El % SB, para las dos capas y fechas de evaluación, en los tratamientos con fertilización se incrementó significativamente, en relación a los tratamientos sin fertilización (Cuadro 4.11). Los valores del % SB en la capa 00 - 25 cm, al inicio se encontraron en el rango bajo y se mantuvieron hasta los 18 meses en los tratamientos sin fertilización; por el contrario, para los tratamientos con fertilización, éstos se incrementaron al rango muy alto a los seis meses manteniéndose en el mismo hasta los 18 meses, esto como resultado de la aplicación de Ca, Mg, K y Zn. En la capa 25 - 50 cm, en los tratamientos con

fertilización, % SB manifestó un ligero, pero estadísticamente significativo incremento, que se mantuvo en el rango medio.

Cuadro 4.11. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para % SB, en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	32,3 a	33,3 a
	6	47,8 b	81,9 a
	18	44,7 b	85,4 a
25 - 50	6	36,0 b	59,0 a
	18	35,0 b	56,0 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

4.2.4. Disponibilidad de nutrientes.

4.2.4.1. Nitrógeno disponible.

Para este elemento se detectaron diferencias estadísticas altamente significativas para el factor fertilización únicamente en la capa 00 - 25 cm (Anexo 7.19). Los valores de los CV fluctuaron en el rango de 15 % a 23 %, lo que indica heterogeneidad del experimento para esta variable. Con fertilización el nitrógeno disponible fue de $9,0 \text{ mg kg}^{-1}$, mientras que sin fertilización fue de $7,9 \text{ mg kg}^{-1}$.

El contenido de N disponible en las capas 00 – 25 cm y 25 - 50 cm, a los 18 meses, en los tratamientos sin y con fertilización, se mantuvo en el rango bajo ($< 20 \text{ mg kg}^{-1}$), aunque siempre fueron menores en la capa 25 - 50 cm. Esta situación, en el caso de los tratamientos fertilizados se atribuye por una parte a una importante toma del elemento por las especies arbóreas, lo cual se refleja en el mayor desarrollo de la biomasa en general y a las pérdidas tanto por lixiviación como por volatilización.

4.2.4.2. Fósforo disponible.

En este elemento se observaron diferencias estadísticas altamente significativas para el factor fertilización a los seis y 18 meses, solamente en la capa de 00 - 25 cm (Anexo 7.20). Los valores del CV oscilaron entre 17 % a 176 %, encontrándose los mayores en la capa 25 – 50 cm, lo que evidencia heterogeneidad del suelo para este elemento en esta capa.

El P disponible (mg kg^{-1}) en los tratamientos con fertilización se incrementó significativamente en comparación con los tratamientos sin fertilización en las dos capas y hasta los 18 meses de evaluación (Cuadro 4.12). El P disponible en la capa 00 - 25 cm, desde el inicio hasta los 18 meses, en los tratamientos sin fertilización se ubicó en el rango bajo ($< 7 \text{ mg kg}^{-1}$); en tanto que, en los tratamientos con fertilización se alcanzó un rango alto, por la aplicación de 150 kg ha^{-1} de P; mientras que en la capa de 25 -50 cm fue significativo pero menor. La permanencia del P disponible en el nivel alto estaría asociada a la neutralización del Al^{3+} por efecto del encalado.

Cuadro 4.12. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para P mg kg^{-1} en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	7 a	6 a
	6	4 b	42 a
	18	4 b	23 a
25 - 50	6	4 b	8 a
	18	3 b	4 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

4.2.4.3. Potasio disponible.

Para este elemento se observaron diferencias estadísticas altamente significativas para el factor fertilización a los seis meses en la capa 00 - 25 cm, y significativas para la capa 25 - 50 cm (Anexo 7.21). Los valores del CV oscilaron en el rango de 22 % a 31 %, siendo mayores en la capa de 25 – 50 cm.

La diferencia estadística altamente significativa del K disponible a los seis meses, en las dos capas por efecto de la fertilización, es por el aporte de K (200 kg ha^{-1}) (Cuadro 4.13). En los tratamientos sin y con fertilización, los contenidos de K disponible en la capa 00 - 25 cm, al inicio, se ubicaron en el rango medio; sin embargo, a los 18 meses en ambos casos descendieron al rango bajo, lo cual se atribuye a la absorción de este nutriente por las especies arbóreas.

El incremento de los contenidos de K^+ disponible en la capa 25 - 50 cm, a los seis meses, aunque dentro del mismo rango bajo, sugiere que una parte del elemento aplicado en la capa 00 - 25 cm se ha movilizado hacia abajo. Esto concuerda con (Padilla, 2009), quien indica que el movimiento del potasio depende del tipo de

suelo, puede lixiviarse en suelos arenosos y en suelos con muy baja capacidad de intercambio catiónico.

Cuadro 4.13. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para K mg kg⁻¹ en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	85 a	72 a
	6	57 b	75 a
	18	43 a	39 a
25 - 50	6	36 b	59 a
	18	23 a	30 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p<= 0,05)

4.2.4.4. Calcio disponible.

En la variable Ca disponible se observaron diferencias estadísticas significativas por efecto de la fertilización a los seis meses en la capa 00 - 25 cm; y, altamente significativas tanto a los 18 meses para la capa 00 - 25 cm, como a los seis y 18 meses para las capas de 25 - 50 cm (Anexo 7.22). Los valores del CV fluctuaron de 32 % a 55 %, lo cual indica heterogeneidad del suelo para este elemento.

En los tratamientos con fertilización, el contenido de Ca disponible (mg kg⁻¹) se incrementó significativamente en relación a los tratamientos sin fertilización en las dos capas y fechas de evaluación (Cuadro 4.14). Al inicio los valores se encontraron en el rango de 95 mg kg⁻¹ a 99 mg kg⁻¹. El aumento del contenido de Ca disponible en la capa 00 - 25 cm, en los tratamientos con fertilización, se debió a la aplicación de la cal agrícola (5 t ha⁻¹); mientras que en la capa 25 - 50 cm, correspondió a la movilización de este elemento desde la capa superior.

Cuadro 4.14. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para Ca disponible (mg kg⁻¹), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	95 a	99 a
	6	168 b	417 a
	18	253 b	590 a
25 - 50	6	120 b	272 a
	18	229 b	339 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (p<= 0,05)

4.2.4.5. Magnesio disponible.

En la variable Mg disponible se observaron diferencias estadísticas altamente significativas para el factor fertilización a los seis y 18 meses en las capas de 0 - 25 cm y 25 - 50 cm; y, diferencias significativas, a los seis y 18 meses en estas capas (Anexo 7.23). Los valores del CV oscilaron en el rango de 30 % a 44 % indistintamente en ambas capas.

En las dos capas, a los seis y 18 meses de evaluación, en los tratamientos con fertilización, el contenido de Mg disponible, aumentó significativamente en relación a los tratamientos sin fertilización (Cuadro 4.15). Al inicio, los contenidos de Mg se encontraron en el rango bajo ($<100 \text{ mg kg}^{-1}$). En la capa de 00 - 25 cm en los tratamientos con fertilización se incrementó a rango alto ($>200 \text{ mg kg}^{-1}$), se debió por la adición de este elemento (118 kg ha^{-1}). En tanto que en la capa de 25 - 50 cm, se incrementó del rango bajo hasta el medio, debido a la lixiviación del Mg aplicado en la capa superior.

Cuadro 4.15. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para Mg disponible (mg kg^{-1}), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	24 a	25 a
	6	114 b	242 a
	18	174 b	368 a
25 - 50	6	75 b	177 a
	18	97 b	169 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

4.2.4.6. Zinc disponible.

El Zn disponible se presentó estadísticamente diferente a los seis y 18 meses para el factor fertilización. Los valores del CV oscilaron en el rango de 62 % a 105 %, con los valores mayores indistintamente en las dos capas (Anexo 7.24).

El contenido de Zn, en los tratamientos con fertilización aumentó significativamente con respecto a los tratamientos sin fertilización, en las dos capas y las dos fechas de evaluación (Cuadro 4.16). Al inicio del experimento permaneció en el rango bajo ($< 2 \text{ mg kg}^{-1}$). En la capa 00 - 25 cm en los

tratamientos con fertilización se incrementó al rango alto ($>7 \text{ mg kg}^{-1}$), lo cual se atribuye a la aplicación de este elemento (40 kg ha^{-1}). Además existió también un incremento del Zn disponible en la capa 25 - 50 cm en los tratamientos con fertilización, debió a la movilización de este elemento desde la capa superior.

Cuadro 4.16. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para Zn disponible (mg kg^{-1}), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	0,6 a	0,6 a
	6	0,7 b	7,2 a
	18	0,9 b	10,3 a
25 - 50	6	0,5 b	2,8 a
	18	0,6 b	3,7 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

4.2.4.7. Cobre disponible.

No se detectaron diferencias estadísticas para ningún factor en estudio. Los valores del CV oscilaron en el rango de 24 % a 61 %, con los valores mayores indistintamente en las dos capas, lo cual evidencia alta heterogeneidad del suelo para esta variable (Anexo 7.25).

Los contenidos de Cu disponible en las dos capas a los 18 meses se mantuvieron en el rango bajo para todos los tratamientos ($<1 \text{ mg kg}^{-1}$). Por cuanto no se incluyó al Cu en la fertilización.

4.2.4.8. Hierro disponible.

Se observaron diferencias estadísticas altamente significativas para el hierro en el factor fertilización a los seis meses y significativas a los 18 meses en la capa 00 - 25 cm (Anexo 7.26). El CV osciló en el rango de 17 % a 54 %, con los valores mayores indistintamente en las dos capas, lo cual indica alta heterogeneidad del suelo para este elemento.

El Fe disponible, en los tratamientos con fertilización, disminuyó significativamente, en comparación a los tratamientos sin fertilización, en la capa de 00 - 25 cm y en las dos fechas de evaluación (Cuadro 4.17). Al inicio del

experimento se encontró en el rango de alto. A pesar de existir disminución de los contenidos de Fe disponible en la capa 00 – 25 cm para los tratamientos con fertilización, se mantuvo en el rango de alto ($> 40 \text{ mg kg}^{-1}$), lo cual se explica por una acumulación residual de este elemento en los suelos del trópico húmedo (Valarezo, 2004a).

Cuadro 4.17. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para Fe disponible (mg kg^{-1}), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	380 a	365 a
	6	286 b	241 a
	18	282 b	217 a
25 - 50	6	243 a	243 a
	18	235 a	219 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

4.2.4.9. Manganeso disponible.

En la capa de 00 - 25 cm para el manganeso disponible se evidenciaron diferencias estadísticas altamente significativas y significativas, para el factor fertilización a los seis y 18 meses, respectivamente (Anexo 7.27). Los valores del CV oscilaron en el rango de 28 % a 72 %, con los valores mayores en la capa 00-25 cm.

En la capa de 00 – 25 cm y a los seis y 18 meses de evaluación, en los tratamientos con fertilización el contenido de Mn disponible, disminuyó significativamente en comparación con los tratamientos sin fertilización (Cuadro 4.18). En la fase inicial del ensayo el contenido fue alto (31 mg kg^{-1} a 35 mg kg^{-1}). En forma similar al Fe, el Mn disponible, para los tratamientos con fertilización, se mantuvieron en el rango de alto ($> 15 \text{ mg kg}^{-1}$), lo cual también se explica por los procesos de acumulación residual de este elemento en los suelos del trópico húmedo.

Cuadro 4.18. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para Mn disponible (mg kg^{-1}), en profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Sin fertilización	Con fertilización
00 - 25	0	31 a	35 a
	6	43 b	30 a
	18	33 b	24 a
25 - 50	6	26 a	22 a
	18	20 a	19 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Finalmente, la reducción del contenido de N, K, Cu, Fe y Mn disponible con el tiempo se atribuye a la absorción de este elemento por las especies maderables en estudio.

4.3. Captura de carbono por las especies arbóreas maderables y aporte al suelo.

4.3.1. Biomasa y contenido de carbono en las especies arbóreas.

Para el peso seco de la biomasa aérea como del carbono almacenado en ésta se observaron diferencias altamente significativas únicamente para el factor fertilización (N + P + K + S + Mg + Zn + cal agrícola); más no para los factores especies arbóreas (melina y pachaco), dosis de carbón vegetal (0 t ha^{-1} , 3 t ha^{-1} y 6 t ha^{-1}) e interacciones. El CV fue de 39,7 % y 39,5 % para la biomasa y el carbono, respectivamente (Anexo 7.28).

Para los tratamientos sin y con fertilización, los valores de la masa seca de la biomasa aérea fueron de $13,7 \text{ t ha}^{-1}$ y $46,3 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente; mientras que el peso de C almacenado en la biomasa fueron de 7 t ha^{-1} y $24,4 \text{ t ha}^{-1}$, en su orden. De ello resulta que el peso de la biomasa y concomitantemente de C almacenado en la parte aérea de los árboles con fertilización fue en proporción 3,5:1 en comparación a sin fertilización.

4.3.2. Carbono en el suelo.

Para el peso del C a los 18 meses en la capa 00 - 25 cm no se detectaron diferencias estadística significativas para ningún factor en estudio; mientras que, en la capa 25 - 50 cm existió diferencias significativas para los factores especies arbóreas y fertilización; y, no significativo para el factor carbón vegetal y sus interacciones. Los valores del CV oscilaron entre 11,5 % y 12,3 % (Anexo 7.28). La ausencia de diferencia estadística significativa sugiere que el suelo inicialmente tuvo una importante cantidad de este elemento, lo cual no se modificó con la aplicación de las dosis de 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal, ni con la aplicación de 5 t ha⁻¹ de carbonato de calcio que se adicionó en la fertilización para disminuir la acidez. Al respecto, Campbell *et al.*, (2005) señalan que los cambios anuales del contenido de C son muy pequeños en relación a aquel existente; y, que, su variabilidad espacial puede ser muy grande.

En la capa 25 – 50 cm, el peso del C fue de 86,3 t ha⁻¹ y 79,4 t ha⁻¹, para los tratamientos de pachaco y melina, respectivamente, generando un incremento de 6,9 t ha⁻¹ por efecto de la especie. En el caso de los tratamientos sin y con fertilización los valores fueron de 79,6 t ha⁻¹ y 86 t ha⁻¹, respectivamente. Se considera prematuro afirmar que estas diferencias reflejen la realidad de los procesos por acción de las especies arbóreas y la fertilización, por lo que deberán ser corroboradas en los futuros muestreos de esta capa en el experimento. Sin embargo se debe mencionar que la mayor cantidad de biomasa que se incorporó al suelo por efecto de la fertilización, tanto por la poda de la melina, la autopoda del pachaco y la vegetación herbácea asociada a los árboles, la misma que ha sido cortada recurrentemente y dejada sobre el suelo en cada sub-subparcela ha influido en el incremento del C en el suelo.

4.3.3. Almacenamiento de C en la biomasa y en el suelo.

Para el peso de C en la biomasa y en las dos capas de suelo (00 - 25 cm y 25 - 50 cm), se observaron diferencias altamente significativas para el factor fertilización, más no para los factores especies arbóreas, carbón vegetal (0 t ha⁻¹,

3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹) e interacciones. El CV fue del 9,2 %, considerado como aceptable (Anexo 7.28).

En los tratamientos con fertilización el valor promedio de C en el sistema (C hasta 50 cm en el suelo + C biomasa aérea) fue de 213,6 t ha⁻¹, correspondiendo el 89 % al C en el suelo hasta 50 cm de profundidad y el 11 % al C de la biomasa aérea. En los tratamientos sin fertilización el promedio del C total en el sistema fue de 188,5 t ha⁻¹, con el 96 % y 4 % en el suelo y biomasa, respectivamente. El incremento del C total en el sistema por efecto de la fertilización fue de 25,1 t ha⁻¹.

El incremento de la biomasa aérea de 32,6 t ha⁻¹ (238 %) y del C almacenado en ésta fue de 17,4 t ha⁻¹ (249 %), se atribuyen al efecto combinado de los nutrientes aplicados (N + P + K + Ca + S + Mg +Zn) y del carbonato de calcio, que neutraliza el aluminio soluble del suelo y, de esta forma, facilita la absorción de los nutrientes, especialmente el fósforo, que como es sabido es precipitado por la acción del aluminio.

La diferencia altamente significativa para el total del C almacenado en la biomasa y en el suelo, hasta una profundidad de 50 cm para el factor fertilización, nuevamente enfatiza el efecto de la aplicación de los nutrientes deficientes y de la disminución de la acidez sobre el desarrollo de la biomasa aérea. En todo caso, el gran reservorio de C en el sistema (rango de 89 % a 96 %) constituye el suelo, lo cual coincide con la afirmación de Anikwe (2010), quien indica que el suelo es el gran reservorio activo del C orgánico que contiene alrededor del doble del C de la atmósfera.

El incremento de la captura de C en los tratamientos con fertilización, cuantificado en 25 t ha⁻¹ hasta los 18 meses después de la plantación, debería ser considerado en el reconocimiento de los servicios ambientales, en el marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto. Swamy y Puri (2005), lograron determinar un incremento de C en el suelo + árbol de 19,5 t ha⁻¹ en plantaciones de melina durante 5 años en la India.

Cabe recalcar que no se evidencian aún respuesta de los niveles de carbón 3 t ha⁻¹ y 6 t ha⁻¹ de carbón vegetal, para las dos especies arbóreas, bajo el efecto de fertilización, es decir los efectos del carbón aparentemente son anulados por la fertilización. Probablemente los efectos del carbón aparecerán cuando no estén enmascarados por la fertilización, aunque todavía es prematuro dilucidar estos comportamientos.

Sobre lo indicado es preciso señalar que la respuesta de los cultivos a las enmiendas con carbón vegetal dependen de las propiedades físicas y químicas de éste, las condiciones climáticas, las condiciones del suelo y el tipo de cultivo (Zwiten *et al.*, 2010; Yamato *et al.*, 2006; Gaskin *et al.*, 2010; Haefele *et al.*, 2011). En esta línea, varios autores han reportado efectos agronómicos tanto positivos como negativos de las aplicaciones de enmiendas de biocarbón en los suelos (Atkinson *et al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2003; Lehmann *et al.*, 2011; Major *et al.*, 2010; Novak *et al.*, 2009; Spokas *et al.*, 2011). Ello sugiere que la aplicación de biocarbón al suelo no es una enmienda de talla única que calce a todos los paradigmas (Spokas *et al.*, 2011), sino más bien requiere de consideraciones cuidadosas de sus propiedades relacionadas con cada material particular de biocarbón y cómo esas propiedades pueden remediar una deficiencia específica en el suelo (Novak y Bussher, 2011).

Se debe reconocer que la naturaleza química y la composición del biocarbón varía ampliamente, dado que consiste en una colección heterogénea de estructuras carbonizadas, elementos inorgánicos entrampados, así como estructuras químicas heredadas del material de origen, sustancias volátiles adsorbidas y ceniza (Brewer *et al.*, 2009; Keiluwet *et al.*, 2010; Spokas *et al.*, 2011). Esta variabilidad es evidente cuando se examina la información sobre la composición orgánica e inorgánica del biocarbón que se reporta en la literatura. Incluso biocarbones obtenidos del mismo material, bajo condiciones similares de pirolisis, pero en unidades diferentes, pueden presentar características químicas diferentes. Además, diferencias en las propiedades físicas y químicas pueden resultar en función del tamaño de la partícula en el mismo tipo de biocarbón (Francioso *et al.*, 2011; Nocentini *et al.*, 2010).

La composición de los grupos superficiales es una característica importante para la exitosa utilización del biocarbón como enmendador de suelos, y podría ayudar en la comprensión de la respuesta tardía de las enmiendas de carbón que ocasionalmente se han observado (Ascough *et al.*, 2011; Cheng *et al.*, 2008; Major *et al.*, 2010). Esto podría explicar la aún no evidente respuesta de pachaco y melina a las diferentes dosis de biocarbón. En este contexto es pertinente hacer referencia a los resultados reportados por Kimetu *et al.*, (2008), en un Ultisol degradado de Kenia (ácido, altamente meteorizado y pobre en nutrientes), que indican que la producción cumulativa de maíz se duplicó después de tres aplicaciones repetidas de 7 t ha^{-1} de biocarbón a lo largo de dos años. Sin embargo, Major *et al.*, (2010) no encontraron cambio en la producción de maíz en el primer año, pero si un aumento significativo en el subsecuente tercer año después de la aplicación de una dosis única de 20 t ha^{-1} de biocarbón de madera en un Oxisol (de similares propiedades químicas que el Ultisol) en la Sabana Colombiana.

En todo caso, las observaciones de Spokas *et al.*, (2011) adicionan credibilidad a la utilización del biocarbón como un adsorbedor del fertilizante nitrogenado, reduciendo las indeseables consecuencias ambientales de las pérdidas de nitrógeno por emisión de gas, flujo superficial y lixiviación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.

Crecimiento de las especies arbóreas.

- La aplicación de cal más la fertilización, mejoró las características dasométricas de altura de planta, diámetro basal y diámetro a la altura del pecho (DAP) en las especies arbóreas, en la etapa inicial del cultivo.
- Hasta los dos años de evaluación, no se evidenciaron efectos consistentes del uso del carbón vegetal sobre el crecimiento de las dos especies arbóreas.

Contenidos totales de los nutrientes en el suelo y su evolución.

- La aplicación de cal más la fertilización originó incrementos de los contenidos totales de Ca, Mg, K, y Zn, en la capa de 00- 25 cm a los 18 meses.
- Los elementos Ca, Mg y K se movilaron desde la capa superior e incrementaron las concentraciones en la capa 25 - 50 cm, en los tratamientos con aplicación de cal más fertilización.
- La aplicación de carbón vegetal no incrementó los contenidos totales de Ca, Mg, Na, Mn, Al, Fe, Zn, Si y Mo en ninguna de las capas del suelo evaluadas.

Evolución de las condiciones químicas y de fertilidad del suelo.

- La aplicación de cal más fertilización incrementó el pH_{H_2O} desde muy fuertemente ácido a fuertemente ácido, en la capa de 00 - 25 cm a los 18 meses.
- La aplicación de cal más fertilizantes disminuyó la acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$) desde el rango alto al medio, en la capa 00 - 25 cm y a los 18 meses.
- La fertilización más la aplicación de cal, elevó la CICe en el suelo de la capa de 00 – 25 cm, a los 18 meses, pasando desde el rango bajo al medio.
- La fertilización más la aplicación de cal incrementaron las concentraciones de las bases intercambiables Ca^{++} y Mg^{++} en las capas 00 – 25 cm y 25 – 50 cm, a los 18 meses.

- La fertilización más la aplicación de la cal, elevó el porcentaje de saturación de bases en la capa 00 – 25 cm, a los 18 meses, pasando del rango medio a muy alto.

Disponibilidad de los nutrientes.

- La fertilización en la capa de 00 - 25 cm, incrementó los contenidos de P, Ca, Mg y Zn a los 18 meses; sin embargo, el N se mantuvo en el rango bajo.
- La fertilización en la capa 25 - 50 cm, incrementó las concentraciones de Ca, Mg y Zn, a los 18 meses, lo que implica una movilización de estos elementos desde la capa superior.

Captura de carbono por las especies arbóreas maderables y aporte al suelo.

- La aplicación de cal más la fertilización elevó el peso de la biomasa aérea y la acumulación del C en la biomasa.
- La aplicación de cal más la fertilización mejoró la acumulación total del C (C total en la biomasa y en el suelo en la capa de 00 - 50 cm), con una captura de 25 t ha^{-1} , efecto de la aplicación de los nutrientes deficientes, disminución de la acidez que favoreció el desarrollo de la biomasa aérea y el aporte del C al suelo.

5.2 Recomendaciones.

- Continuar con el registro del crecimiento de las especies arbóreas, la evolución de los contenidos totales y disponibles de nutrientes, condiciones químicas y de fertilidad; así como, la cuantificación de la captura de carbono por la biomasa y su variación en el suelo, hasta los cinco años después de la plantación, a fin de determinar el verdadero efecto del carbón vegetal y la rentabilidad económica de los tratamientos.

- Replicar la tecnología generada sobre el mejoramiento de la gestión de la fertilidad del suelo basado en la fertilización (N, P, K, Ca, Mg, Zn, B y S + cal) en sistemas agroforestales con cacao y café.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Acosta, M., Etchevers, J., Monreal, C., Quednow, K., y Hidalgo, C. 2001. Un método para la medición del carbono en los compartimentos subterráneos (Raíces y Suelo) de sistemas forestales y Agrícolas en terrenos de ladera en México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia Chile, 18 -20 octubre.
- 2) Aguirre, N., T, Ojeda, P., Eguiguren, P. 2010. El cambio climático y la conservación de la biodiversidad en el Ecuador. *Revista CEDAMAZ* 1 (01): 16-21.
- 3) Aguirre, Z., y León, N. 2010. Adaptación de especies nativas maderables y no maderables con potencial de aprovechamiento múltiple en el sur de la amazonia ecuatoriana. *Revista CEDAMAZ* 1 (01): 51-56.
- 4) Alexander, S., Schneider, S., Lagerquist, K. 1998. *Nature's Services: societal dependence on natural ecosystems* (Washington, D.C: Gretchen C: Dally), "The interaction of climate and life", 476 p.
- 5) Anikwe, M. 2010. Carbon storage in soils of Southeastern Nigeria under different management practices. *Carbon Balance and Management* 5:5.
- 6) Ascough, P. L., Bird, M. I., Francis, S. M., Thornton, B., Midwood, A. J., Scott, A. C., Apperley, D. 2011. Variability in oxidative degradation of charcoal: influence of production conditions and environmental exposure, *Geochim Cosmochim Acta* 75(9)2361-2378.
- 7) Atkinson, C., Fitzgerald, J., Hips. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar applications to temperate soils: a review. *Plant Soil* 337(1):1-18.
- 8) Bechtold, G. 2002. *Anthrohumox in Brazilian lowland*. Summary of Thesis. Consultado en agosto 2010. Disponible en <http://www.geocites.com/gbechtold/gbtp1.html>.
- 9) Berkowitz, N., Chakrabarty, S., Cook, F., y Fujikawa, J. 1970. On the agrobiological activity of oxidatively ammoniated coal. *Soil Sci.* 110:211-217.

- 10) Brewer, C. E., Schmidt-Rohr, K., Satrio, J. A., Brown, R. C. 2009. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environ Progr Sust Energy* 28(3):386-396.
- 11) Brown, S. 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. In Congreso Forestal Mundial (11, Antalya, Turquía), Actas. Antalya, Turquía, Ministry of Forestry. pp.107-128.
- 12) Callo-Concha, D., Krishnamurthy, y Alegre, J. 2001. Cuantificación del carbono secuestrado por algunos SAF's y testigos, en tres pisos ecológicos de la Amazonía del Perú. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia Chile, 18 -20 octubre.
- 13) Campbell, C., Janzen, H., Paustian, K., Gregorich, E., Sherrod, L., Liang, B. C., y Zentner, R. 2005. Carbon Storage in Soils of the North American Great Plains: Effect of Cropping Frequency. *Agron J.* 97:349-363.
- 14) Cáseres, L., y Núñez, A. 2011. *Cambio Climático Ecuador*. Proyecto GEF/PNUD/MAE Segunda Comunicación Nacional sobre cambio Climático. Quito. 293 p.
- 15) Cenamo, M., Garzón, A., Pavan, M., Sandoval, M., y Stern, M. 2011. *Análisis de REDD+ en ocho países de la Cuenca Amazónica*. Articulación Regional Amazónica. p. 46.
- 16) Chidumayo, E. 1994. Effects of wood carbonization on soil an initial development of seedlings in miombo woodland, Zambia. *For Ecol Manage* 70:353-357.
- 17) Cheng, C. H., Lehmann, J., Engelhard, M. H. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochim Cosmochim Acta* 72(6):1598 – 1610.
- 18) Cochrane, T., Sánchez, P. 1980. Land resources, soil properties and their management in the Amazon region: a state of knowledge report. In: International Conference on Amazon Land Use and Agricultural Research, CIAT. Cali, Colombia.
- 19) CORMADERA. 2002. *Guías técnicas para Plantaciones Forestales en el Ecuador*. CORMADERA, Quito - Ecuador, *Gmelina arborea*, p. 85-111.

- 20) Cuellar, N., Rosa, H., González, M. 1999. "Los servicios ambientales del agro: El caso del café de sombra en el Salvador". *PRISMA*. 34: 1-16.
- 21) Da Silva, A., Urban, R., Manfré, L., Carvalho, R., y Camargo, P. 2011. *Estoque de carbono em solos com diferentes coberturas*. Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Sorocaba. São Paulo, Brasil. p 267-279.
- 22) Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C. (2008). *InfoStat*, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- 23) Duncan, P., Jurgen, B., Bruenig, F., Burgess, P., Cabarde, B., Cassells, D., Douglas, J., Gilmour, D., Hardcastle, P., Hartshorn, G., Kaimowitz, D., Kishor, N.; Leslie, A., Palmer, J., Putz, F., Salleh, N., Synott, T., Wadsworth, F., Whitmore, T. 1999. "No Habrá bosques sin manejo: sustentación de ecosistemas forestales bajo condiciones inciertas". *Actualidad Forestal Tropical* 6 (4): 10-12.
- 24) Espinoza, J. 2010. *Acidez y encalado*. Curso Avanzado de fertilidad de los suelos. Universidad Tecnológica Equinoccial. Santo Domingo de los Tsáchilas. p. 19.
- 25) FAO. 1975. "Guía y Claves para la Descripción de Perfiles de Suelos".
- 26) Finegan, B., y Delgado, D. 1997. "*Ciclos y flujos de materia y energía: Ecosistema, océano y atmosfera*. Bases Ecológicas". Turrialba. Costa Rica. CATIE. p.11-15.
- 27) Fisher, M. J., y Trujillo, W. 1999. Fijación de carbón en pastos tropicales en sabanas de suelos ácidos neotropicales. Seminario Internacional intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios, Económicos y Ambientales. (Turrialba, Costa Rica; FAO – CATIE, SIDE. p.115-135.
- 28) Francioso, O., Sánchez Cortez, S., Bonora, S., Roldan, M. L., y Certini, G. 2011. Structural characterization of charcoal size fractions from a burnt Pinus pinea forest by FT-IR, Raman and surface-enhanced Raman spectroscopies. *J. Mol. Struct* 994(1-3):155-162
- 29) Galán, G. 1982. *Caracterización Petrológica y Geoquímica de la granodiorita*. Universidad de Oviedo.12. p. 133-151.

- 30) Gaskin, J. W., Speir, R. A., Harris, K., Das, K. C., Lee, R. D., y Morris, L. A. 2010. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield- *Agron. J.* 102:623-633.
- 31) Glaser, B., Guggenberger, G., y Zech, W. (2002a). Past anthropogenic influence on the present soil properties of anthropogenic dark earths (Terra Preta) in Amazonia (Brazil). *Geoarcheology* (in press).
- 32) Glaser, B., Lehmann, J., y Zech, W. (2002b). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*: 35:219-230.
- 33) Goldberg, E. 1985. *Black carbon in the environment*. Wiley, New York. p.198.
- 34) Gottle, A., y El-Hadji, N. 1997. XI CONGRESO FORESTAL MUNDIAL. 13 a 22 de Octubre de 1997. Antalya. Turquía.
- 35) Haefele, M. S., Konboon, Y., Wongboon, W., Amarante, S., Maiafat, A. A., Pfeifer, M. E., y Knoblauch, C. 2011. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crops Res.* 121:430-440.
- 36) Hall y Rao Hall, D. O., y Rao, K. K. 1994. *Photosynthesis*. 5th ed (Cambridge, Cambridge University Press). p. 211.
- 37) Herrero, C., Bravo, F., y Turrión, M. 2011. *Cuantificación del carbón en el suelo y en el mantillo en pinares y rebollares del Norte de España*. Instituto Universitario de Investigación y Gestión Forestal Sostenible (ETSIIAA). Universidad de Valladolid. España. pp. 249-266.
- 38) INSTITUTO ECUATORIANO DE MINERIA (DGGM) (1989). *Mapa geológico del Ecuador. Hojas de Paquisha y Zamora*. Instituto Geográfico Militar. Quito, Ecuador.
- 39) International Panel Climate Change (IPCC) 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Disponible en: <http://www.ipcc.ch>. (Consultado 16 de agosto 2012)
- 40) Keiluweit, M., Nico, P. S., Johnson, M. G., y Kleber, M. 2010. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environ Sci Technol* 44(4):1247- 1253.

- 41) Kimetu, J., Lehmann, J., Ngoze, S. O., Mugendi, D. N., Kinyangi J. M., Riha, S., Verchot, L., Recha, J. W y Pell, A. N., 2008. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. *Ecosystems* 11:726-739.
- 42) Kishimoto, S., y Sugiura, G. 1985. Charcoal as a soil conditioner. *Int Achieve Future*, 5:12-23.
- 43) Kojima, M., Yamamoto, M., Marsoem, S., Okuyama, T., Yoshida, M., Nakai, T., Yamashita, S., Saegusa, K., Matsune, K., Nakamura, K., Inoue y Arizono, T. 2009. Effects of the lateral growth rate on wood quality of *Gmelina arborea* from 3 - 5 - 7- and 12-year-old plantations. Faculty of Forestry, Gadjah Mada University Jl. *Agro No.1*, Bulaksumur, Yogyakarta 55281, Republic of Indonesia. p.6.
- 44) Lehmann, J., Silva, J., Rondon, M., Silva, C., Greenwood, J., Nehls, T. Steiner, C., y Claser, B. 2002. Slash-and-char- a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon. In: Soil Science: Confronting New Realities in the 21st century. 7th World Congress of Soil Science, Bangkok. p. 12.
- 45) Lehmann, J., Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W y Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archeological Anthrosol and a Ferrasol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249: 343-357.
- 46) Lehmann, J., Rillig, M., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C. y Crowley D. 2011. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biol Biochem* 43: 1812-1836.
- 47) Lotter, D. 2002. Tropical soil fertility, Terra Preta soils of the Amazon. News and Research. *The New Farm*.
- 48) Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J y Lehman, J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant Soil*. 333 (1-2):117-128.
- 49) Mgagwu, J., y Piccolo, A. 1997. *Effects of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield*. In: Drozd J. Gonet SS. Senesi ĩ, Weber, J. (eds) *The role of humic substances in the ecosystems and*

- in environmental protection. IHSS, Polish Society of Humic Substances, Wroclaw, Poland. p. 921-925.
- 50)** Nocentini, C., Certini, G., Knicker, H., Francioso, O. y Rumpel, C. 2010. Nature and reactivity of charcoal produced and added to soil during wildfire are particle-size dependent. *Org Geochem.* 41(7):682-689.
- 51)** Novak, J. M., Bussher W. J., Laird, D. L., Ahmenda, M., Watts, D. W y Niandou M. A. S. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern coastal plain soil. *Soil Sci.* 174(2):105-112.
- 52)** Novak, J. M., y Bussher, W. J. 2011. Selection and use of designer biochars to improve characteristics of Southern USA Coastal Plain degraded soils. *Advanced Biofuels and Byproducts. Springer Science.* New York. p. 69-96.
- 53)** Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. and Dean, L. A.1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. Department of Agriculture. Circular 939. U.S.Washington, D.C.
- 54)** Otsamo, A. 2002. Early effects of four fast-growing tree species and their planting density on ground vegetation in *Imperata grasslands*. *New Forests* 23: 1–17.
- 55)** Padilla, W. 2007. Suelos. CD 4^a edición. Quito - Ecuador. p. 327.
- 56)** Ramírez, O., Rodríguez, L., Finegan, B., y Gomez, M. 1999. “Implicaciones económicas del secuestro de CO₂ en los bosques naturales”. *Revista Forestal Centroamericana.* 2(27): 10-16.
- 57)** Ramos, R. 2003. *Fraccionamiento del carbono orgánico del suelo en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barrancas, Puntarenas – Costa Rica.* Tesis. Mg. Sc. Turrialba, CR, CATIE. p. 45-50.
- 58)** Spokas, K. A., CCantrll, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., Boateng, A. A., Lima, I. M., Lamb, M. C., McAloon, A. J., Lentz, R. D., y Nichols, K. A. 2011. Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality.* p. 973 - 989.
- 59)** Swamy, S. L., y Puri, S. 2005. Biomass production and C- sequestration of *Gmelina arborea* in plantation and agroforestry system in India. *Agroforestry Systems.* 64: 181-195.

- 60) Sys, C. 1979. Regional Pedology. *Tropical Soils II*. Lecture notes. State University of Ghent, Belgium.
- 61) UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (2010). *Keys to Soil Taxonomy*. Eleventh Edition. Natural Resource Conservation Service p.338.
- 62) Urrego, J. 2004. Growth potential of *Gmelina arborea* at tree years of age in Colombia. *New Forest* 28: 269–276.
- 63) Valarezo, C. (2004a). *Características, distribución, clasificación y capacidad de uso de los suelos en la Región Amazónica Ecuatoriana*. Universidad Nacional de Loja- Programa de Modernización de los Servicios Agropecuarios –PROMSA. Editorial Universitaria, Loja. p. 201.
- 64) Valarezo, C. (2004b). *Gestión de la fertilidad del suelo en el trópico húmedo, en la región Amazónica ecuatoriana y bajo sistemas agroforestales*. Universidad Nacional de Loja- Programa de Modernización de los Servicios Agropecuarios –PROMSA. Editorial Universitaria, Loja. p.141.
- 65) Valarezo, C., Iñiguez, M., Valarezo, L., y Guaya, P. 1998. *Condiciones físicas de los suelos de la región sur del Ecuador*. Una guía para proyectos de riego, drenaje, manejo y conservación de suelos. Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador. p. 227.
- 66) Valarezo, C., Maza, H., Chamba, C., Valarezo, L., Merino, B., Villamagua, M., Mora., y González, R. 2010. Criterios en la instalación de los experimentos y caracterización de los sitios del proyecto “Gestión de la fertilidad del suelo con enmiendas de carbón vegetal en plantaciones de árboles maderables en el sur de la amazonia ecuatoriana”. *Revista CEDAMAZ* 1(01). pp. 65 – 80
- 67) Veldkamp, E. 1993. *Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica*. Tesis pH. D.; Wageningen, Netherlands, Agriculture University of Wageningen. p. 117.
- 68) Vinueza, M. 2012. Ecuador Forestal. Ficha Técnica N° 3: Melina. 2 p. Disponible en [www.ecuadorforestal.org/fichas-técnicas-de-especies forestales](http://www.ecuadorforestal.org/fichas-técnicas-de-especies-forestales). Consultado el 5 de julio 2013.
- 69) Wedephol, H.1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. (59) 7. p. 1217 – 1232.
- 70) Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I. F., Anshori, S. y Ogawa, M. (2006) Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield o

maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. *Soil Sci Plant Nutr* 52:489-495.

- 71)** Zwieten, V. L., Kimber, S., Morris, S., Chan, Y. K., Downie, A., y Rust, J. (2010) Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* 327:235-246.

7. ANEXOS.

7.1. Esquema de distribución de los tratamientos y una subparcela

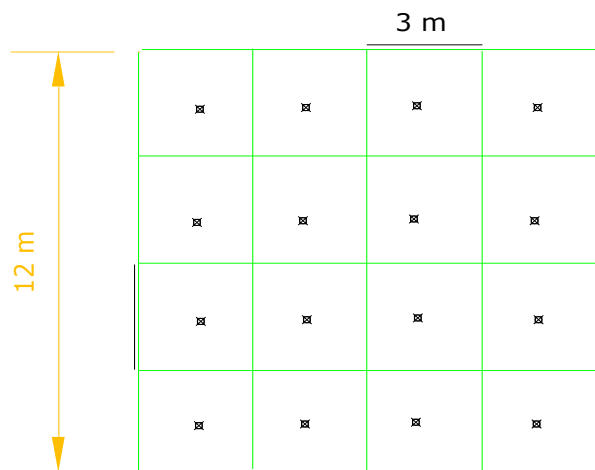
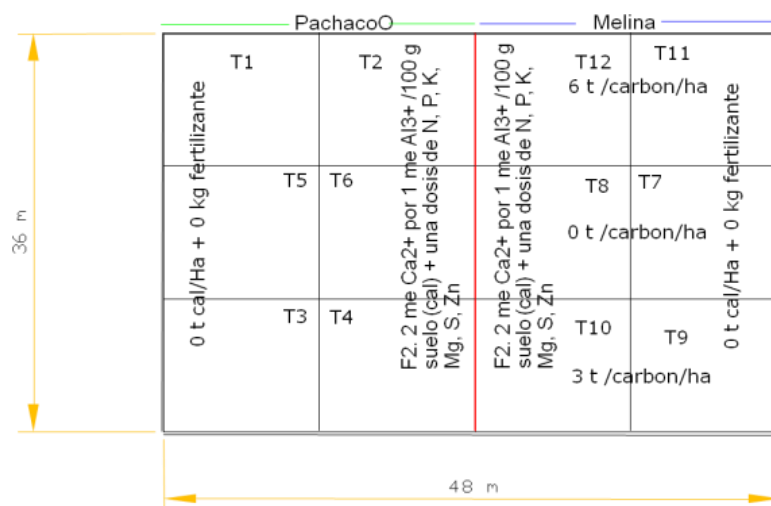


Figura 2: Esquema de una sub-subparcela

7.2. Descripción del perfil de suelo.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
CENTRO DE ESTUDIOS Y DESARROLLO DE LA AMAZONÍA (CEDAMAZ)
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: GESTIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO CON
ENMIENDAS DE CARBÓN VEGETAL EN PLANTACIONES DE ÁRBOLES MADERABLES
EN EL SUR DE LA AMAZONÍA ECUATORIANA

FICHA DE DESCRIPCION DE PERFILES DE SUELOS EN LOS SITIOS EXPERIMENTALES

Código: ZP1. **Fecha:** 24/03/09 **Autor:** Carlos Valarezo y Miguel Villamagua

Sitio: La Victoria, Zamora.

Altitud (msnm): 949. **Coordenadas** 9 552541 E, 0730469 N. **Pendiente:** 15%

Paisaje: pie de monte; **Tipo de relieve:** vertiente; **Forma del Terreno:** ladera,

Uso Actual o cobertura vegetal: Pasto brachiaria.

Condiciones de Humedad: (*húmedo*). **Pedregosidad superficial:** 0 %; **Tamaño:** cm

Afloramientos rocosos: No Tipo_____No_____ **Material parental:** granito

Profundidad de la capa freática: profundidad No_ cm fluctuación_No_____ cm

Presencia de Sales o Alcalis: libre; **Drenaje:** Moderado

Clasificación taxonómica preliminar USDA (2006): Typic Kandihumults.



DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PERFIL

Suelo muy profundo formado a partir de roca granítica. El perfil está conformado por una pequeña capa orgánica (Horizonte O) de 3 a 4 cm de espesor y seis horizontes minerales diferenciados : un horizonte Ap de 16 cm de espesor, gris muy oscuro, franco al tacto; un horizonte AE, de 14 cm de espesor, gris muy

oscuro, franco arenoso a arenoso franco al tacto; un horizonte Bt1 de 30 cm de espesor, castaño grisáceo oscuro, franco arcillo arenosos al tacto; un horizonte Bt2, de 20 cm de espesor, pardo amarillento, arcillo arenoso al tacto; un horizonte CB de 22 cm de espesor amarillo castaño, arcilloso al tacto; y un horizonte C, de 28 cm de espesor, de color blanco, arcillo limoso al tacto. El suelo no ha sido arado sin embargo el horizonte A recibe el sufijo p por cuanto ha estado bajo pastura. En la capa AE aumenta el contenido de arena y disminuye la arcilla, pero se mantiene el color obscuro similar al Ap. En los horizontes B aumenta el contenido de arcilla y se observan cutanes muy delgados y discontinuos en los pedios y granos de cuarzo. Los horizontes Bt2 y C presentan algunas manchas herrumbrosas. En el C2 se encuentran granos de cuarzo menores y mayores a 2 mm.

Descripción individual de los horizontes o capas ZP1:

O 00 – (-4 cm)	Horizonte orgánico.
Ap 00 – 16 cm	Gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; franco al tacto; gránulos, finos y medios, moderadamente desarrollados; ligeramente adherente, ligeramente plástico, muy friable; poros muchos, finos y medios; raíces abundantes, finas y muy finas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.
AE 16- 30 cm	Gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; franco arenoso a arenoso franco al tacto; bloques subangulares, medios y finos, moderadamente desarrollados; ligeramente adherente, no plástico, muy friable en húmedo; poros frecuente, finos y medianos; raíces pocas, muy finas y finas; sin reacción al HCl diluido; límite neto y plano.
Bt1 30- 50 cm	Pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo; franco arcillo arenoso al tacto; bloques subangulares, medios y gruesos, moderadamente desarrollados; ligeramente adherente, plástico, muy friable en húmedo; cutanes discontinuos y muy delgados; poros pocos, finos y medios; raíces muy pocas,

muy finas y finas; sin reacción al HCl diluido; límite neto y ondulado.

- | | | |
|-----|------------|---|
| Bt2 | 50-70 cm | Pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo; arcillo arenoso al tacto; bloques angulares y subangulares, medios y gruesos, moderadamente desarrollados; adherente, plástico, friable en húmedo; cutanes discontinuos y muy delgados; poros pocos, finos y medios; raíces muy pocas, muy finas y finas; sin reacción al HCl diluido; límite neto y plano. |
| CB | 70-92 cm | Amarillo pardo (10YR 6/6) en húmedo; arcilloso al tacto; masivo y bloques subangulares gruesos, moderadamente desarrollado; adherente, plástico, friable en húmedo; poros pocos, medios; raíces muy pocas, muy finas; sin reacción al HCl diluido; límite neto y plano. |
| C | 92- 120 cm | Blanco (10YR 8/2) en húmedo; arcillo limoso al tacto; masivo; adherente, muy plástico, friable en húmedo; poros muy pocos, muy finos; fragmentos rocosos, frecuentes, gravilla y angular; sin raíces; sin reacción al HCl diluido. |

7.3. Ecuación alométrica del pachaco

Peso copa Verde (kg)	Diámetro copa (m)	Altura copa (m)	D^2	$D^2.L$	$(D^2.L)^2$	P^2	$(D^2.L)P$	P Peso calculado
P	D	L						
2,7	2,2	1,1	4,7	5,1	25,9	7,3	13,7	3,8
5,5	3,6	2,3	12,7	29,3	860,8	30,3	161,4	5,9
1,2	2,1	1,0	4,6	4,4	19,1	1,4	5,3	3,8
10,3	3,6	2,1	13,0	26,6	705,9	106,1	273,7	5,7
1,8	1,9	0,9	3,7	3,3	11,0	3,2	6,0	3,7
6,9	3,1	2,6	9,6	25,1	631,5	47,6	173,4	5,5
28,4	16,5	9,9	48,2	93,8	2254,2	195,9	633,4	28,4
P				D	D2	P2	D x P	

$$b = \frac{DP - \frac{P \times D}{n}}{D^2 - \frac{D}{n}}$$

$$P = 3.4110 + 0.0846 D^2 L$$

$$b = 0,0846$$

$$a = \frac{P}{n} - \frac{bD}{n}$$

$$a = 3,4111$$

7.4. Ecuación alométrica de la melina.

Peso copa Verde kg	Diámetro copa (m)	Altura copa(m)	D^2	$D^2.L$	$(D^2.L)^2$	P^2	$(D^2.L)P$	P Calculado
P	D	L						
7,30	2,9	1,6	8,1	13,3	176,4	53,3	96,9	10,8
15,00	3,5	2,7	12,3	33,3	1110,2	225,0	499,8	13,0
5,80	2,2	1,3	4,6	6,2	38,1	33,6	35,8	10,0
17,00	3,2	2,5	10,2	26,0	673,8	289,0	441,3	12,2
5,00	2,7	1,5	7,2	10,7	113,7	25,0	53,3	10,5
19,30	3,5	2,6	12,3	31,7	1002,8	372,5	611,2	12,8
69,4	17,9	12,3	54,6	121,1	3114,9	998,4	1738,3	69,4
P				D	D2	P2	D x P	

$$p = 9.3627 + 0.1092 D^2 L$$

7.5. Análisis de varianza para la variable Altura de planta, en seis fechas de muestreo, en días después de la plantación

Fuente de variación	Cuadrados medios					
	190 (1)	250	300	400	540	720
Bloques	0,18ns	0,23ns	0,17ns	0,23ns	0,59ns	2,23ns
Especie arbórea	0,4ns	0,07ns	0,12ns	0,02ns	0,02ns	0,01ns
Error experimental (a)	0,23	0,49	0,51	0,50	0,83	1,72
Fertilización	12,7**	20,87**	34,73**	44,12**	62,24**	85,92**
Fertilización. x E. arbórea	0,01ns	0,01ns	0,07ns	0,28ns	2,60ns	4,47ns
Error experimental (b)	0,17	0,22	0,29	0,63	1,32	2,69
Carbón	0,01ns	0,03ns	0,02ns	0,07ns	0,03ns	0,21ns
Fertilización x Carbón	0,07ns	0,21ns	0,19ns	0,49ns	1,03ns	0,21ns
E. arbórea x Carbón	0,06ns	0,11ns	0,05ns	0,20ns	0,30ns	0,45ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,22ns	0,44*	0,40ns	0,82ns	1,43ns	1,52ns
Error experimental (c)	0,07	0,13	0,20	0,27	0,54	0,66
Coeficiente de variación (%)	15,13	14,14	14,67	14,64	16,18	15,26

(1) Días después de la plantación; ns no significativo; * Significativo; ** Altamente significativo

7.6. Análisis de varianza para la variable diámetro basal, en seis fechas de muestreo, en días después de la plantación.

F. de variación	Cuadrados medios					
	190 (1)	250	300	400	540	720
Bloques	1,47ns	2,19ns	2,59ns	2,53ns	6,31ns	10,23ns
Especies arbóreas	1,58ns	2,61ns	17,67*	105,11**	114,61*	7,30ns
Error experimental (a)	0,78	1,01	1,37	1,99	3,95	5,24
Fertilización	69,94**	115,94**	163,61**	225,2**	287,09**	307,34**
Fertilización x E. arbórea	0,08ns	0,12ns	0,08ns	0,03ns	1,06ns	4,97ns
Error experimental (b)	0,91	2,05	2,72	4,36	6,74	8,78
Carbón	0,07ns	0,004ns	0,02ns	0,59ns	0,18ns	0,23ns
Fertilización X Carbón	0,12ns	0,54ns	0,51ns	1,45ns	3,88ns	1,09ns
E. arbórea x Carbón	0,25ns	0,62ns	0,40ns	1,58ns	0,88ns	2,55ns
E. arbórea x Fert. X Carbón	0,94ns	1,63*	1,45ns	3,82ns	5,62ns	3,42ns
Error experimental (c)	0,34	0,65	1,00	1,35	2,67	1,95
Coeficiente de variación (%)	14,59	13,62	13,90	12,77	15,43	14,31

7.7. Diámetro de altura al pecho (DAP), Volumen de las especies arbóreas a los dos años después de la plantación en el experimento

Fuente de variación	DAP	Volumen
Blo	10,2 ns	1467,7 ns
Árbol	7,30 ns	7249,6 ns
Blo*Árbol	5,24	1320,8
Fert	307,3 **	39738,3**
Fert*Árbol	5 ns	347,2 ns
Árbol>Fert*Blo	8,8	1147,7
Carbón	0,23 ns	12,97 ns
Fert*Carbón	1,1 ns	72,7 ns
Arbol*Carbón	2,6 ns	47,4 ns
Arbol*Fert*Carbón	3,4 ns	369,3 ns
Error	1,95	439,01
Coeficiente de variación %	16,4	41

7.8. Contenidos Totales de Ca, Mg, K, Na, Mn, Al, Fe, Zn, Si y Mo (mg kg⁻¹), en las capas, de las parcelas del bloque I, a los 6 y 18 meses después de la fertilización.

Tratamientos	Capa Cm	Tiempo aplicación (meses)	Ca	Mg	Na	K	Mn	Al	Fe	Zn	Si	Mo
T1	00-25	6	37	424	74	913	54	40980	14910	10	322400	0
		18	264	250	118	296	19	29560	13030	11	376000	0
	25-50	6	183	272	112	473	30	64960	18870	14	371000	1
T2	00-25	18	117	271	90	441	38	64430	10890	11	404600	0
		6	477	366	127	863	63	38070	14840	16	314700	0
	25-50	6	56	305	70	763	14	37240	15490	10	418700	0
T3	00-25	18	101	441	78	1527	38	73100	11520	16	403900	0
		6	195	280	296	866	64	24330	12980	11	419600	0
	25-50	6	114	296	311	883	25	22960	13000	12	388900	0
T4	00-25	18	289	218	156	284	13	20850	12720	5	444200	1
		6	375	180	82	518	42	21260	10160	7	377300	0
	25-50	6	363	403	108	825	22	32120	15340	16	414500	0
T5	00-25	18	225	384	124	1376	38	54000	9420	16	402400	0
		6	122	378	100	926	53	39410	13380	14	341000	0
	25-50	6	140	243	147	427	51	53880	7250	15	404500	0
T6	00-25	18	146	288	94	418	35	55520	9490	9	420000	0
		6	1076	431	94	872	53	32090	13960	26	326100	0
	25-50	6	88	374	82	883	17	37560	15930	10	411100	3
T7	00-25	18	247	270	72	386	24	57180	8222	13	263700	0
		6	23	505	79	1249	56	54030	14080	12	292100	0
	25-50	6	149	247	85	430	17	55730	16180	12	399900	1
T8	00-25	18	116	288	93	586	38	81120	10670	31	388800	0
		6	2158	536	100	1024	57	44380	14800	30	313200	0
	25-50	6	74	408	74	958	17	51670	16860	14	469800	0
T9	00-25	18	56	469	96	1626	39	73560	11460	18	377600	0
		6	199	198	106	269	7	24360	10120	5	324600	0
	25-50	6	161	509	113	1620	54	69580	8973	10	412700	0
T10	00-25	18	139	222	80	505	15	70080	17490	14	415700	1
		6	187	305	140	620	41	76750	10100	16	387700	0
	25-50	6	1205	516	241	1072	53	35330	13430	36	311200	0
T11	00-25	18	1111	490	191	1419	50	50390	7583	72	418300	0
		6	369	439	97	1076	16	36490	14160	21	420100	0
	25-50	6	372	508	71	1689	42	76580	9995	21	371300	0
T12	00-25	18	87	520	67	1056	63	60730	15220	29	357300	0
		6	226	309	146	556	53	78350	10400	17	371000	0
	25-50	6	164	225	83	416	24	59920	16690	16	426000	1
T12	00-25	18	98	272	82	565	39	86260	10620	17	365400	0
		6	1673	513	53	938	27	44110	14640	35	387100	1
	25-50	6	597	442	106	1490	46	64190	9207	23	407100	0
		18	616	406	12	925	12	50470	16810	13	356900	0
		18	57	381	68	1513	33	71950	10890	13	387200	0

7.9. Balance del contenido total de Ca (g kg⁻¹) en las capas de las parcelas del bloque 1, a los 6 y 18 meses después de la fertilización

Tratamientos	00 - 25 cm			25 - 50 cm
	0 meses	18 meses	Balance	18 meses
T1 (pachaco + SF + 0 t ha ⁻¹ CV: testigo)	0,46	0,26	-0,19	0,12
T2 (pachaco + CF + 0 t ha ⁻¹ CV)	0,54	1,09	0,55	0,10
T3 (pachaco + SF + 3 t ha ⁻¹ CV)	0,45	0,11	-0,33	0,23
T4 (pachaco + CF + 3 t ha ⁻¹ CV)	0,40	0,95	0,55	0,22
T5 (pachaco + SF + 6 t ha ⁻¹ CV)	0,36	0,30	-0,06	0,15
T6 (pachaco + CF + 6 t ha ⁻¹ CV)	0,31	0,64	0,33	0,25
T7 (melina + SF + 0 t ha ⁻¹ CV: testigo)	0,33	0,11	-0,23	0,12
T8 (melina + CF + 0 t ha ⁻¹ CV)	0,25	0,59	0,34	0,056
T9 (melina + SF + 3 t ha ⁻¹ CV)	0,23	0,16	-0,07	0,19
T10 (melina + CF + 3 t ha ⁻¹ CV)	0,30	1,11	0,81	0,37
T11 (melina + SF + 6 t ha ⁻¹ CV)	0,19	0,23	0,03	0,10
T12 (melina + SF + 6 t ha ⁻¹ CV)	0,25	0,60	0,35	0,06

7.10. Balance y medias de contenidos totales de Ca, Mg, K (g kg⁻¹), Na, Mn, Zn (mg kg⁻¹), Al, Fe y Si (g kg⁻¹), en las capas, de las parcelas del bloque I, a los 6 y 18 meses después de la fertilización

Media y Balance Contenidos totales	Mg	Ca	K	Na	Zn	Mn	Fe	Al	Si
	g kg ⁻¹			mg kg ⁻¹			g kg ⁻¹		
Media de Σ Balances contenidos totales 18 meses -inicial SF 00-25 cm	0,09	-0,14	0,56	7	5,53	-11,18	-2,94	17,89	56,23
Media de Σ Balances contenidos totales final-inicial CF capa 00- 25 cm	0,14	0,49	0,94	-46	30,11	-9,13	-3,29	10,99	72,12
Media Contenidos totales (SF+ CV) a los 18 meses 00-25 cm	0,36	0,20	0,87	179	13,47	45,88	9,91	56,19	394,28
media Contenidos totales (SF + CV) a los 0 meses 00-25 cm	0,27	0,31	0,35	149	7,98	54,12	13,51	38,27	330,45
Diferencia de medias (SF + CV) 18 meses -0 meses 00-25 cm	0,09	-0,11	0,52	30	5,49	-8,24	-3,60	17,92	63,83
Media contenidos totales (CF + CV) a los 18 meses 25-50 cm	0,39	0,23	1,24	84	15,56	34,27	9,63	64,93	356,15
Media contenidos totales en los testigos 25-50 cm	0,28	0,12	0,51	91	20,69	37,66	10,78	72,78	396,70
Diferencia de medias contenidos totales (CF + CV)-testigos	0,11	0,11	0,73	-7	-5,13	-3,39	-1,15	-7,85	-40,55

7.11. Adeva para el pH_{H2O} en tres épocas de muestreo (meses después de la plantación), en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios pH _{H2O}				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 meses	18 meses	6 meses	18 meses
Bloques	0,06 ns	0,04 ns	0,07 ns	0,06 ns	0,03 ns
Especie arbórea	0,03 ns	0,04 ns	0,03 ns	0,01 ns	0,004 ns
Error experimental (a)	0,02	0,12	0,09	0,02	0,02
Fertilización	0,01 ns	4,31 **	1,61 **	0,20 *	0,29 **
Fertilización. x E. arbórea	0,02 ns	0,01 ns	0,04 ns	0,01 ns	0,01 ns
Error experimental (b)	0,02	0,07	0,02	0,02	0,01
Carbón	0,03 ns	0,10 ns	0,08 ns	0,04 ns	0,01 ns
Fertilización x Carbón	0,004 ns	0,004 ns	0,03 ns	0,03 ns	0,01 ns
E. arbórea x Carbón	0,01 ns	0,08 ns	0,06 ns	0,06 ns	0,01 ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,01 ns	0,07 ns	0,01 ns	0,04 ns	0,01 ns
Error experimental (c)	0,02	0,05	0,04	0,02	0,02
Coefficiente de variación (%)	3,1	4,8	3,8	3,1	2,8

7.12. Adeva para la acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$) $cmol (+) kg^{-1}$ en tres fechas de muestreo, en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios ($Al^{3+} + H^+$) $cmol (+) kg^{-1}$				
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 6 mes	00-25 cm 18 mes	25-50 cm 6 mes	25-50 cm 18 mes
Bloques	4,21 ns	2,05 ns	5,65 *	2,76 ns	5,03 **
Especie arbórea	4,32 ns	0,38 ns	0,02 ns	0,27 ns	0,08 ns
Error experimental (a)	0,69	0,51	0,58	0,44	0,08
Fertilización	0,29 ns	47,6 **	53,7 **	12,7 **	5,01 **
Fertilización. x E. arbórea	0,42 *	0,10 ns	0,19 ns	0,15 ns	0,01 ns
Error experimental (b)	0,48	0,26	0,16	0,23	0,14
Carbón	0,05 ns	0,48 ns	0,04 ns	0,03 ns	0,08 ns
Fertilización x Carbón	0,47 ns	0,61 ns	0,01 ns	0,30 ns	0,23 ns
E. arbórea x Carbón	0,41 ns	0,19 ns	0,65 ns	1,42 *	0,06 ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,09 ns	0,52 ns	0,22 ns	0,39 ns	0,11 ns
Error experimental (c)	0,31	1,01	0,2	0,28	0,2
Coefficiente de variación (%)	16,84	37,47	19,33	22,37	13,36

7.13. Adeva para la CICe en tres épocas de muestreo, en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios CICe				
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 6 mes	00-25 cm 18 mes	25-50 cm 6 mes	25-50 cm 18 mes
Bloques	4,55 ns	4,39 ns	13,9 ns	7,78 **	12,02ns
Especie arbórea	3,31 ns	10,57 ns	1,9ns	0,11ns	0,52ns
Error experimental (a)	0,68	8,30E-04	22,8	0,24	2,85
Fertilización	0,33 ns	2,07ns	133,3 **	0,26 ns	20,02 **
Fertilización. x E. arbórea	0,04 ns	0,01 ns	0,8 ns	0,01ns	0,37ns
Error experimental (b)	0,32	0,3	6,5	1,08	0,91
Carbón	0,18ns	9,03ns	0,0 ns	0,02ns	0,02 ns
Fertilización x Carbón	0,23 ns	0,37ns	0,7 ns	0,07 ns	0,4ns
E. arbórea x Carbón	0,2 ns	1,6 ns	7,2 ns	0,51 ns	0,31 ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,15 ns	1,45 ns	8,1 ns	0,24ns	0,07ns
Error experimental (c)	0,21	0,88	4,8	0,69	0,96
Coefficiente de variación (%)	10	26	28	18	16

7.14. Adeva para el Ca^{++} en tres épocas de muestreo, en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios Ca $cmol(+)$ kg^{-1}				
	00-25 cm 0 mes	00-25 cm 6 mes	00-25 cm 18 mes	25-50 cm 6 mes	25-50 cm 18 mes
Bloques	0,02 ns	1,45 ns	12,0 ns	0,79 ns	3,6 ns
Especie arbórea	0,2 ns	0,46 ns	2,0 ns	0,62 ns	0,45 ns
Error experimental (a)	0,04	1,23	25,5	0,26	2,81
Fertilización	0,09 ns	25,59 ns	285,4 **	8,23 *	32,87 **
Fertilización. x E. arbórea	0,02 ns	0,56 ns	0,8 ns	0,09 ns	0,65 ns
Error experimental (b)	0,06	10,28	6,2	1,08	0,39
Carbón	0,09 ns	0,18 ns	0,01 ns	3,00E-03 ns	0,11
Fertilización x Carbón	0,05 ns	1,11 ns	0,6 ns	0,29 ns	0,03
E. arbórea x Carbón	0,14*	0,68ns	11,7 ns	0,47ns	0,67ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,03ns	3 ns	7,3 ns	0,17 ns	0,01ns
Error experimental (c)	0,03	1,48	5,0	0,51	0,89
Coefficiente de variación (%)	22	50	54	54	45

7.15. Adeva para el Mg⁺⁺ en tres épocas de muestreo, en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios Mg cmol(+) kg ⁻¹				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	0,03 ns	0,95 *	0,07 ns	0,32 *	0,04 ns
Especie arbórea	0,01 ns	0,01 ns	0,08 ns	2,00E-03 ns	0,03 ns
Error experimental (a)	0,01	0,04	0,12	0,03	0,02
Fertilización	0,01 ns	2,75 **	3,69 **	0,7 **	0,68 **
Fertilización. x E. arbórea	0,01 ns	0,01 ns	0,13 ns	2,20E-03 ns	1,00E-05 ns
Error experimental (b)	0,01	0,05	0,02	0,04	0,01
Carbón	0,01 ns	0,06 ns	0,01ns	0,05 ns	0,01 ns
Fertilización x Carbón	0,01 ns	0,01 ns	0,02 ns	0,01 ns	3,00E-03 ns
E. arbórea x Carbón	0,01 ns	0,09 ns	4,00E-03 ns	0,08 *	0,02 ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,01 ns	0,04 ns	0,02 ns	0,01ns	0,01ns
Error experimental (c)	0,01	0,05	0,04	0,02	0,02
Coefficiente de variación (%)	38	30	24	34	29

7.16. Adeva para el K⁺ en tres épocas de muestreo, en las capas de suelo

Fuente de variación	Cuadrados medios K cmol(+) kg ⁻¹				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	0,010ns	0,060*	0,02ns	0,03ns	0,01ns
Especie arbórea	0,003ns	0,003ns	0,01ns	0,0035ns	0,0031ns
Error experimental (a)	0,005	0,002	0,01	0,0041	0,01
Fertilización	0,001ns	0,110**	0,0037ns	0,13**	0,02ns
Fertilización. x E. arbórea	0,020ns	0,0001 ns	0,0003ns	0,0011ns	0,0036ns
Error experimental (b)	0,010	0,002	0,0046	0,01	0,0043
Carbón	0,001ns	0,004ns	0,0001ns	0,00001ns	0,0038ns
Fertilización x Carbón	0,010ns	0,002ns	0,0023ns	0,01ns	0,00003ns
E. arbórea x Carbón	0,020ns	0,002ns	0,0001ns	0,003ns	0,001ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,010ns	0,004ns	0,001ns	0,001ns	0,003ns
Error experimental (c)	0,010	0,004	0,002	0,003	0,001
Coefficiente de variación (%)	58	26	21	34	30

7.17. Adeva para el Na⁺ en tres fechas de muestreo, en las capas de suelo

Fuente de variación	Cuadrados medios Na				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	0,020ns	0,03ns	0,03ns	0,06ns	9,98*
Especie arbórea	0,0001ns	0,0002ns	1,40E-05ns	4,90E-04ns	4,38ns
Error experimental (a)	0,003	0,00490	4,00E-03	0,01	0,51
Fertilización	0,004ns	0,00003ns	2,00E-05ns	2,60E-04ns	0,14ns
Fertilización. x E. arbórea	0,004ns	0,00049ns	3,70E-03ns	0,01ns	2,52ns
Error experimental (b)	0,004	0,00420	0,01	0,01	0,48
Carbón	0,010ns	0,00072ns	0,01ns	2,10E-03ns	0,12ns
Fertilización x Carbón	0,002ns	0,00130ns	4,60E-03ns	0,01ns	0,09ns
E. arbórea x Carbón	0,010ns	0,00130ns	3,20E-05ns	2,80E-03ns	0,11ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,020*	0,00150ns	0,01ns	0,01ns	0,29ns
Error experimental (c)	0,004	0,01000	0,01	0,01	
Coefficiente de variación (%)	24	31	32	37	30

7.18. Adeva para la SB % en tres fechas de muestreo, en las capas de suelo

Fuente de variación	Cuadrados medios % SB				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	133,9ns	115,4ns	639,13ns	48,1ns	377,0ns
Especie arbórea	216,8ns	200,1ns	1,02ns	192,0ns	5,3ns
Error experimental (a)	51,7	142,5	317,8	110,8	187,3
Fertilización	12,0ns	13940,1**	19886,02**	6394,1**	5166,8**
Fertilización. x E. arbórea	176,3ns	65,3ns	46,02ns	108,0ns	8,3ns
Error experimental (b)	83,8	231,4	39,97	195,9	15,8
Carbón	1,0ns	86,6ns	3,58ns	4,5ns	32,5ns
Fertilización x Carbón	114,1ns	172,6ns	45,58ns	168,2ns	2,4ns
E. arbórea x Carbón	111,8ns	14,1ns	102,08ns	397,3ns	31,7ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	47,3ns	410,6ns	21,58ns	106,2ns	13,2ns
Error experimental (c)	55,9	130,0	43,24	123,6	74,0
Coefficiente de variación (%)	23	18	10	23	19

7.19. Adeva para N disponible, 24 meses después de la plantación, en las capas.

Fuente de variación	Cuadrados medios N				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques			4,3ns		1,89ns
Especie arbórea			5,32ns		8,29ns
Error experimental (a)			1,85		6,29
Fertilización			13,42*		2,46ns
Fertilización. x E. arbórea			1ns		1,71ns
Error experimental (b)			1,56		2,22
Carbón			4,46ns		0,56ns
Fertilización x Carbón			1,6ns		0,79ns
E. arbórea x Carbón			0,93ns		0,09ns
E. arbórea x Fert. x Carbón			1,06ns		0,06ns
Error experimental (c)			1,14		0,39
Coefficiente de variación (%)			13		12

7.20. Adeva para el P disponible en tres fechas de muestreo, en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios P				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	6,95ns	13ns	418,9ns	53ns	18,53ns
Especie arbórea	1,24ns	35ns	121,3ns	114ns	1,14ns
Error experimental (a)	2,49	304	284,3	85	38,97
Fertilización	1,90E-03ns	17660**	4262,0**	180ns	4,69ns
Fertilización. x E. arbórea	1,96ns	86ns	241,7ns	64ns	21,07ns
Error experimental (b)	0,72	159	295,9	130	37,17
Carbón	1,59ns	22ns	26,1ns	163ns	15,57ns
Fertilización x Carbón	2,52ns	33ns	39,9ns	42ns	37,03ns
E. arbórea x Carbón	1,16ns	26ns	3,0ns	142ns	97,44ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	4,36ns	20ns	4,8ns	19ns	47,28ns
Error experimental (c)	1,25	84	93,1	107	34,49
Coefficiente de variación (%)	17	40	70	161	176

7.21. Adeva para el K disponible en tres épocas de muestreo, en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios K				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	1358ns	3301ns	2056ns	1018*	704ns
Especie arbórea	807ns	59ns	127ns	180ns	230ns
Error experimental (a)	224	412	297	74	80
Fertilización	2108ns	4163**	140ns	5963*	554ns
Fertilización. x E. arbórea	359ns	6ns	56ns	124ns	4ns
Error experimental (b)	464	282	123	544	127
Carbón	479ns	433ns	170ns	149ns	264*
Fertilización x Carbón	340ns	139ns	133ns	164ns	15ns
E. arbórea x Carbón	656ns	120ns	32ns	194ns	83ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	447ns	309ns	19ns	195ns	36ns
Error experimental (c)	299	278	85	220	60
Coefficiente de variación (%)	22	25	22	31	29

7.22. Adeva para el Ca disponible en tres épocas de muestreo, en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios Ca				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	2216ns	221257*	23863ns	92800*	177098*
Especie arbórea	1302ns	46061ns	111631ns	6165ns	137ns
Error experimental (a)	1017	12797	27929	9926	9755
Fertilización	271ns	747275*	1362558**	276640**	144870**
Fertilización. x E. arbórea	1261ns	27500ns	118286ns	4563ns	10770ns
Error experimental (b)	688	68621	71701	17816	7575
Carbón	1392ns	657ns	11184ns	1106ns	30922ns
Fertilización x Carbón	842ns	8367ns	16008ns	701ns	2471ns
E. arbórea x Carbón	600ns	13486ns	2732ns	26604ns	7983ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	247ns	6582ns	8469ns	11296ns	4164ns
Error experimental (c)	945	25496	18188	9365	9742
Coefficiente de variación (%)	32	55	32	49	35

7.23. Adeva para el Mg disponible en tres épocas de muestreo, en las capas.

Fuente de variación	Cuadrados medios Mg				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	152ns	257368**	264850*	119386*	62716**
Especie arbórea	9ns	1599ns	6816ns	469ns	6302ns
Error experimental (a)	80	3691	16473	5605	1593
Fertilización	39ns	196736**	451632*	124644*	62496**
Fertilización. x E. arbórea	285ns	2567ns	2187ns	44ns	2977ns
Error experimental (b)	112	11331	18248	12888	2935ns
Carbón	82ns	11001ns	3891ns	915ns	285ns
Fertilización x Carbón	109n	4519ns	7837ns	22ns	55ns
E. arbórea x Carbón	46ns	7917ns	12724ns	9443ns	5470ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	118ns	1419ns	11328ns	2451ns	3389ns
Error experimental (c)	97	4490	6439	3020	1972
Coefficiente de variación (%)	40	38	30	44	34

7.24. Adeva para el Zn disponible en tres épocas de muestreo, en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios Zn				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	0,05ns	11,8 ns	13,6ns	7,3*	6,7ns
Especie arbórea	0,15ns	0,5ns	0,0ns	2,3ns	1,7ns
Error experimental (a)	0,1	3,8	3,6	0,3	2,4
Fertilización	0,06ns	499,2**	1063,1**	64,4**	115,9**
Fertilización. x E. arbórea	0,78*	1,4ns	1,0ns	1,9ns	3,6ns
Error experimental (b)	0,11	5,1	9,1	2,4	4,5
Carbón	0,22ns	3,8ns	11,9ns	1,5ns	7,6ns
Fertilización x Carbón	0,21ns	1,9ns	14,1ns	1,7ns	4,4ns
E. arbórea x Carbón	0,21ns	2,2ns	1,4ns	3,8ns	3,0ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,68*	2,0ns	0,7ns	4,4ns	5,8ns
Error experimental (c)	0,13	7,0	5,3	2,0	5,2
Coefficiente de variación (%)	62	67	41	88	105

7.25. Adeva para el Cu disponible en tres épocas de muestreo, en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios Cu				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	cm 18 mes
Bloques	0,38ns	1,96*	1,32*	1,19*	1,7*
Especie arbórea	0,03ns	0,04ns	0,14ns	0,08ns	0,2ns
Error experimental (a)	0,07	0,07	0,18	0,11	0,1
Fertilización	0,01ns	0,19ns	0,96ns	0,01ns	0,7ns
Fertilización. x E. arbórea	0,08ns	0,07ns	1,2ns	0,06ns	0,5ns
Error experimental (b)	0,11	0,05	0,32	0,01	0,3
Carbón	0,1ns	0,01ns	4,40E-03	0,01ns	0,4ns
Fertilización x Carbón	0,03ns	0,07ns	0,13ns	0,03ns	0,3ns
E. arbórea x Carbón	0,29ns	0,01ns	0,25ns	0,07ns	0,3ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0,07ns	2,50E-03ns	0,08ns	4,00E-03ns	0,3ns
Error experimental (c)	0,06	0,03	0,19	0,03	0,2
Coefficiente de variación (%)	24	34	61	54	82

7.26. Adeva para el Fe disponible en tres fechas de muestreo, en las capas

Fuente de variación	Cuadrados medios Fe				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	72891ns	126182ns	39657ns	115939ns	13365*
Especie arbórea	230ns	16024ns	114075ns	341ns	105750ns
Error experimental (a)	7647	33600	55402	6540	24611
Fertilización	2715ns	24889**	51091*	0,33ns	2961ns
Fertilización. x E. arbórea	3056ns	3384ns	3745ns	9075ns	11ns
Error experimental (b)	6015	1572	6125	10018	2193
Carbón	6445ns	11967ns	42312ns	37065ns	40523ns
Fertilización x Carbón	1089ns	4038ns	7077ns	320ns	343ns
E. arbórea x Carbón	2049ns	659ns	30233ns	5534ns	22814ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	11439ns	20872ns	10530ns	3546ns	257ns
Error experimental (c)	4105	5322	13607	10140	15036
Coefficiente de variación (%)	17	28	47	41	54

7.27. Adeva para el Mn disponible en tres fechas de muestreo, en las capas.

Fuente de variación	Cuadrados medios Mn				
	00-25 cm	00-25 cm	00-25 cm	25-50 cm	25-50 cm
	0 mes	6 mes	18 mes	6 mes	18 mes
Bloques	3668ns	552*	3230**	232*	2104**
Especie arbórea	1261ns	1ns	3ns	56ns	29ns
Error experimental (a)	1186	29	26	25	38
Fertilización	176ns	2067**	928*	169ns	15ns
Fertilización. x E. arbórea	602ns	68ns	54ns	0ns	20ns
Error experimental (b)	569	77	69	51	25
Carbón	536ns	198ns	154ns	153ns	43ns
Fertilización x Carbón	152ns	123ns	111ns	315ns	15ns
E. arbórea x Carbón	615ns	114ns	114ns	33ns	62ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	0ns	290ns	51ns	34ns	16ns
Error experimental (c)	558	125	63	81	58
Coefficiente de variación (%)	72	31	28	38	38

7.28. Análisis de varianza de biomasa aérea, C en la biomasa, C en el suelo (t/ha) en las capas; y C total (biomasa + C 00-50 cm suelo), a los dos años después de la plantación.

Fuente de variación	CUADRADOS MEDIO CO TOTAL				
	Biomasa aérea	C biomasa	00 a 25 cm	25 a 50 cm	C Total: biomasa + 00 a 50 cm
Bloques	452ns	125ns	1165ns	579*	3587*
Especie arbórea	4089ns	1075ns	17ns	575*	22ns
Error experimental (a)	469	126	287	30	127
Fertilización	12760**	3623 **	21ns	497*	7578**
Fertilización. x E. arbórea	369ns	116ns	249ns	18ns	86ns
Error experimental (b)	403	111	162	42	322
Carbón	10ns	2ns	71ns	3ns	80ns
Fertilización x Carbón	21ns	5ns	38ns	104ns	215ns
E. arbórea x Carbón	91ns	24ns	10ns	50ns	148ns
E. arbórea x Fert. x Carbón	127ns	39ns	94ns	228ns	318ns
Error experimental (c)	140	39	158	90	344
Coefficiente de variación (%)	47	47	12,3	11,5	9,2